LA LUMIÈRE

SES CAUSES ET SES EFFETS

PAR

M. EDMOND BECQUEREL

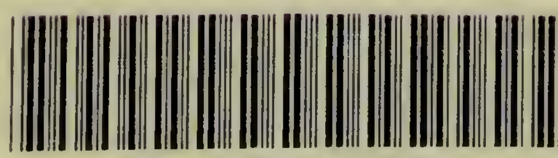
DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES
DE L'INSTITUT DE FRANCE
PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE IMPÉRIAL DES ARTS ET MÉTIERS, ETC., ETC.

TOME SECOND

EFFETS DE LA LUMIÈRE

PARIS

LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRERES, FILS ET C[ie]
IMPRIMEURS DE L'INSTITUT
RUE JACOB, 56


22400004084

LA LUMIÈRE

SES CAUSES ET SES EFFETS

TOME II

TYPOGRAPHIE FIRMIN DIDOT. — MESNIL (EURE).

LA LUMIÈRE

SES CAUSES ET SES EFFETS

PAR

M. EDMOND BECQUEREL

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

DE L'INSTITUT DE FRANCE

PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE IMPÉRIAL DES ARTS ET MÉTIERS, ETC., ETC.

TOME SECOND

EFFETS DE LA LUMIÈRE

PARIS

LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES, FILS ET CIE

IMPRIMEURS DE L'INSTITUT, RUE JACOB, 56

1868

IIᴱ PARTIE.

EFFETS DE LA LUMIÈRE.

PRÉLIMINAIRES.

EFFETS DIVERS PRODUITS PAR LA LUMIÈRE.

EXTINCTION DE LA LUMIÈRE; TRANSPARENCE, DIFFUSION ET COULEURS DES CORPS.

Un faisceau de rayons solaires ou de rayons émanés d'une source lumineuse d'une intensité suffisante non-seulement impressionne la rétine en donnant la sensation de la lumière, mais encore produit sur les corps des effets très-divers : il donne lieu à une élévation de température des corps placés sur sa route; il peut produire des effets de phosphorescence qui ont été étudiés dans la première partie de cet ouvrage; il peut opérer la décomposition de certaines substances ou provoquer leur combinaison; il peut agir enfin sur des substances organiques et sur les végétaux en produisant différentes réactions chimiques ou des effets physiologiques.

D'un autre côté, l'influence des corps peut modifier la direction, la composition et l'intensité des rayons qui les pénètrent. Mais ces effets sont relatifs aux changements que les ondes lumineuses reçoivent dans leur propagation au travers des corps et font partie des questions d'optique qui se trouvent développées dans les traités de physique; on ne saurait donc s'en occuper ici. On ne parlera pas non plus des phénomènes de phosphorescence qui ont été analysés avec détails dans le pre-

mier volume. On avait prétendu que les rayons solaires avaient le pouvoir d'aimanter des aiguilles d'acier; mais il a été reconnu que les actions magnétiques observées tenaient à des causes étrangères à l'influence lumineuse (1). On ne pourrait affirmer que les diverses actions physiques, chimiques et physiologiques citées ci-dessus soient les seules que la lumière puisse produire, mais on peut dire que ce sont les seules qui aient été observées.

Toutes les observations faites jusqu'ici tendent à montrer que ces différents effets sont dus à la transmission de mouvements vibratoires des sources lumineuses aux corps qui en reçoivent l'influence. Il se manifeste tel ou tel de ces effets suivant peut-être le genre de mouvement communiqué aux corps ainsi que selon la longueur d'onde des rayons lumineux et la nature des corps.

On ne connaît pas le genre de mouvement moléculaire qui donne lieu dans les corps au phénomène de chaleur. On ne sait pas non plus si lors de la transmission des vibrations aux molécules des corps les vibrations perpendiculaires à la direction des rayons lumineux, et qui produisent la sensation de la lumière, donnent seules des actions calorifiques et chimiques, et si des vibrations dans le sens longitudinal ne pourraient pas être transmises aux corps et engendrer quelques-uns des effets dont il s'agit. Cependant, les effets de polarisation observés dans le rayonnement de la chaleur ainsi qu'avec les matières chimiquement impressionnables, effets qui sont semblables à ceux que les rayons lumineux produisent, font présumer que le même genre de mouvement vibratoire donne lieu à ces différents ordres de phénomènes. Quoi qu'il en soit, les différentes actions que l'on observe dépendent de l'influence d'un même rayonnement qui se trouve modifié suivant la nature des corps impressionnables ainsi que suivant la réfrangibilité et l'intensité des rayons actifs.

Les effets produits les plus généraux sont les effets de chaleur, et il est possible que si tous les rayons étaient suffisamment intenses, quelle que soit leur longueur d'onde, ils donneraient lieu par absorption dans les corps qu'ils frappent à une élévation de température. D'après cette hypothèse, qui est actuellement la plus probable, les rayons lumineux émanés d'une source éclairante ne différeraient des

(1) Voir Becquerel, *Traité exp. d'électricité* en 7 v., t. 1, p. 384. J. Herschell, *Traité de la lumière*, t. 2, p. 87; traduct. française par M. Quetelet.

rayons calorifiques qu'en ce que, indépendamment de l'action générale de chaleur, ils exerceraient sur la rétine une action physiologique, et sur certains corps des effets chimiques dont l'intensité ne serait pas en rapport avec l'intensité calorifique produite et ne dépendrait que de la longueur d'onde des rayons actifs, de la sensibilité de la rétine ou de la nature des réactions chimiques qui peuvent se produire.

Les différents effets que la lumière peut engendrer sont inégalement appréciables par la rétine ou par les appareils destinés à leur étude, ce qui revient à dire que la sensibilité de la rétine et de ces appareils n'est pas la même pour une intensité déterminée d'un faisceau de rayons lumineux. Les thermomètres ou les piles thermo-électriques que l'on peut employer exigent une action d'une certaine énergie pour donner des indications : l'on sait qu'un thermomètre exposé au soleil ne monte guère au delà de 40 à 50°; en admettant qu'on puisse évaluer le $\frac{1}{100}$ de degré thermométrique centigrade, on ne pourrait estimer que le $\frac{1}{4000}$ ou $\frac{1}{5000}$ de l'action solaire; aussi ne peut-on pas évaluer l'action calorifique de la lune, dont le rayonnement est 800000 fois moins intense que celui du soleil (1). Mais, d'un autre côté, l'on peut apprécier l'action de rayons relativement bien moins intenses au moyen des effets chimiques, des phénomènes de phosphorescence ainsi que des impressions sur la rétine : les photographies de la lune et des planètes indiquent en effet quelle est la sensibilité des réactions chimiques opérées par la lumière; on a vu également dans le premier volume que des rayons d'une intensité bien moindre que celle des rayons lunaires pouvaient rendre phosphorescents certains corps, et l'on a rapporté (2) les expériences qui indiquent quelle était la faible intensité des rayons que l'œil pouvait apprécier et entre quelles limites d'une étendue vraiment prodigieuse cet organe pouvait être impressionné; pour en donner une idée on peut dire que si l'on représente par l'unité l'intensité lumineuse d'une bougie, la lumière solaire est plus de 50000 fois plus intense, et que les corps très-faiblement phosphorescents dont l'intensité n'est que de $\frac{1}{1500000000}$ de la première peuvent encore être distingués dans l'obscurité.

La lumière ne peut frapper un corps sans qu'une partie du mouvement ondulatoire ne soit éteint, et cela proportionnellement à l'action

(1) Voir tome 1er, page 5.
(2) Id., id, page 296.

produite dans le corps, le mouvement transmis étant employé à modifier ce corps physiquement ou chimiquement; on dit alors qu'il y a extinction ou absorption de lumière. Si l'on n'observait aucune action calorifique, aucun effet physique ou chimique, l'intensité des rayons transmis par un corps, jointe à celle des rayons réfléchis et diffusés, devrait reproduire l'intensité des rayons incidents; mais tel n'est pas le cas ordinaire, car on n'a trouvé jusqu'ici aucun corps absolument transparent pour la chaleur, quelle que soit la longueur d'onde des rayons, et parfois les corps éprouvent des changements chimiques ou donnent lieu à des effets de phosphorescence. Cette conclusion suppose que le mouvement lumineux en se transmettant aux corps ne donne lieu qu'aux phénomènes physiques ou chimiques cités plus haut; car s'il se produisait des mouvements moléculaires ne correspondant à aucun phénomène connu, il pourrait y avoir extinction de lumière sans effet actuellement appréciable. Ces motifs font supposer qu'il est bien difficile de déterminer ce que l'on pourrait nommer l'équivalent mécanique de la lumière à moins de connaître tous les effets qu'un faisceau lumineux pourrait produire sur un corps, ou de s'en tenir à une certaine approximation, si avec certains corps l'un quelconque de ces effets, l'effet calorifique, par exemple, l'emportait de beaucoup sur les autres.

Lorsque la lumière frappe un corps, la quantité éteinte ou absorbée dépend de la nature et de l'état du corps ainsi que de l'état de sa surface et de son épaisseur. Les expériences démontrent que les corps les plus transparents, solides, liquides ou gazeux, diminuent l'intensité des rayons lumineux (1). Cette absorption peut être très-grande avec les substances colorées et surtout avec les corps noirs; dans ce dernier cas elle est complète sous une épaisseur assez faible, et il n'échappe à l'absorption que la lumière réfléchie et diffusée.

(1) Dans chaque corps l'extinction dépend de l'épaisseur de ce corps. Soit I l'intensité d'un faisceau lumineux incident; soit I' l'intensité du faisceau transmis après qu'il a traversé une épaisseur *e* du corps, en faisant abstraction de la perte par réflexion à la surface; soit encore *n* le coëfficient d'absorption ou la fraction qui représente ce que l'intensité lumineuse est devenue après l'épaisseur 1 du corps :

après l'épaisseur 1 l'intensité lumineuse I est devenue $I_1 = nI$
après l'épaisseur 2.......................... elle est $I_2 = nI_1 = n^2 I$
etc.
et après l'épaisseur *e*...... .... $I_e = n^e I$
c'est-à-dire que l'on a $I = I n^e$

En général, l'absorption est élective, c'est-à-dire qu'elle n'a pas lieu indifféremment et avec la même intensité pour tous les rayons quelle que soit leur longueur d'onde. L'absorption quelquefois a lieu pour certains rayons et ne se produit pas pour des rayons de plus grande ou de moindre réfrangibilité, et alors les corps placés sur le trajet d'un faisceau lumineux, avant ou après sa réfraction par un prisme, donnent lieu à un spectre discontinu présentant des raies noires ou des bandes suivant la la largeur des espaces qui manquent dans l'image prismatique; mais souvent aussi cette absorption se produit en totalité au delà ou en deçà d'une certaine réfrangibilité, et dans ce cas des parties entières du spectre peuvent disparaître, soit les parties les plus réfrangibles, soit celles les moins réfrangibles, comme on en aura des exemples dans les livres suivants.

L'on a vu dans le premier volume, pages 162 et suivantes, quels sont les effets remarquables produits à des températures plus ou moins hautes par les vapeurs agissant comme écrans sur les rayons lumineux, et comment l'absorption qui se produit alors donne lieu au phénomène des raies noires du spectre solaire; les effets curieux que présente la vapeur d'eau et dont il a été question tome Ier, page 134, montrent que les gaz permanents donnent les mêmes effets que les vapeurs à des températures élevées. Bien que cette absorption, en éliminant une certaine quantité de rayons, doive rendre colorées ces matières sous une certaine épaisseur, cependant cette coloration n'est souvent pas appréciable. Quand les gaz sont fortement colorés, ce phénomène devient très-tranché; ainsi la vapeur nitreuse et la vapeur d'iode donnent des raies nombreuses, et ces raies, par leur largeur, peuvent devenir alors de véritables bandes noires. Quelquefois même les gaz absorbent des parties entières du spectre et ne présentent pas de raies ou bandes définies; tel est le cas du chlore, qui absorbe complétement la partie du spectre plus réfrangible que la raie F, c'est-à-dire le bleu et le violet prismatique.

Les liquides transparents donnent également lieu à des phénomènes semblables; mais cette absorption, quand elle n'est pas complète pour certaines parties du spectre, donne plutôt des bandes que des raies noires; parmi les dissolutions qui présentent ces effets d'une manière remarquable on doit citer les dissolutions des sels d'erbium et de dydyme.

D'après MM. Bahr et Bunsen (1), les dissolutions des sels d'erbium,

(1) *Ann. de chimie de physique*, 4e série, t. 9, p. 481.

interposées sur le trajet d'un faisceau de rayons lumineux avant sa réfraction dans le prisme d'un spectroscope, présentent huit raies ou plutôt huit bandes noires, deux dans le rouge vers B et C, quatre dans le vert près de E et deux dans le bleu entre F et G. Ce qu'il y a de particulier, comme on l'a déjà vu tome Ier, page 164, c'est que les positions de ces bandes coïncident exactement avec celles des huit bandes lumineuses que donne l'erbine incandescente placée dans la flamme non éclairante d'un bec de gaz. Ainsi les composés de l'erbium offrent un exemple remarquable d'une substance qui porte dans ses combinaisons le même pouvoir d'absorption sur les rayons lumineux que celui dont elle est douée elle-même, mais à des températures différentes; le renversement des raies brillantes en raies obscures a donc lieu, non-seulement à égalité de température, mais encore entre différents points de l'échelle thermométrique, ce qui montre que le pouvoir d'absorption des sels d'erbium sur certains groupes de rayons lumineux se maintient entre des limites calorifiques différentes.

Les dissolutions des sels de dydyme placées dans les mêmes conditions donnent des effets d'absorption analogues. Pour faire aisément l'expérience, on prend une dissolution assez concentrée de sulfate de dydyme renfermée dans un écran en verre à faces parallèles que l'on place sur la route d'un faisceau lumineux émané d'un bec de gaz, avant sa réfraction dans un spectroscope. On trouve alors que l'image du spectre est traversée par plusieurs raies ou bandes noires : on distingue plusieurs raies fines entre les raies A et D du spectre solaire, dont l'une située près de B est assez forte. Près de D il se trouve une bande remarquable par sa largeur et par la netteté avec laquelle elle termine les parties voisines de l'image prismatique. Dans le vert, entre E et F, il y a plusieurs bandes dont quatre sont bien distinctes et entre F et G, dans le bleu, on voit quatre bandes inégales de largeur. Il faut remarquer en outre, que l'image du spectre ainsi observée, ne comprend pas une seule ligne se trouvant aux mêmes places que celles des lignes des sels d'erbium.

Lorsque les substances placées ainsi sur la route des rayons lumineux avant leur réfraction par un prisme offrent deux ou plusieurs maxima d'intensité, l'absorption inégale des rayons de diverse réfrangibilité suivant l'épaisseur de l'écran est la cause des changements de teinte observés quand on transmet directement la lumière blanche au travers d'une masse plus ou moins épaisse de matière. Telle est

l'explication du dichroïsme offert par une dissolution de chlorure de chrome qui est verte par transmission sous une petite épaisseur, et rouge sous une plus grande épaisseur; la dissolution de tournesol dans les mêmes conditions passe du bleu au rouge. D'autres corps peuvent présenter également des changements de nuances, quand ils sont vus par transmission sous des épaisseurs variables, et ils ne paraissent pas de même couleur par transmission ou par réflexion.

Les corps solides transparents donnent lieu à des effets du même genre, mais dans les images prismatiques les bandes d'absorption sont moins nettement terminées qu'avec les gaz ou les liquides dont on vient de parler. On verra dans les livres suivants que les corps solides transparents et incolores peuvent absorber plus ou moins les parties infra-rouges ou ultra-violettes du spectre lumineux; mais quand ils sont colorés, leur coloration indique leur grande puissance absorbante pour certains groupes de rayons lumineux. On peut comme exemple citer les effets produits par le verre bleu coloré par le cobalt : quand on place sur le trajet des rayons lumineux, avant ou après leur réfraction, une lame de ce verre mais dont la couleur est un peu claire, on voit une image prismatique formée de trois parties lumineuses; la première rouge, la deuxième jaune verdâtre, la troisième bleue et violette, et il y a deux larges bandes obscures qui traversent l'image prismatique et dont les bords se fondent insensiblement avec les parties lumineuses voisines. Si la lame de verre bleue est plus foncée, la partie lumineuse jaune verdâtre diminue d'intensité et finit par disparaître quand la coloration du verre est suffisante, et il ne reste que deux parties lumineuses dans le spectre, l'une rouge, l'autre bleue et violette. Les verres bleus colorés par le cuivre ne se comportent pas de même; ils absorbent les rayons rouges extrêmes.

Les matières colorées en rouge ne laissent passer généralement que la partie la moins réfrangible du spectre, tandis que celles qui sont colorées en violet ou en bleu absorbent ces mêmes rayons et laissent passer la partie la plus réfrangible du rayonnement lumineux.

Les verres très-foncés et presque noirs sont de deux sortes; les uns ne laissent passer que des rayons rouges ou du moins font paraître rouge le disque du soleil quand on regarde directement cet astre au travers de ces écrans; les autres ne laissent passer que des rayons verts.

Quand le pouvoir absorbant d'un corps pour la lumière est très-grand, la quantité de rayons transmis diminue rapidement à mesure que l'é-

paisseur augmente, et l'on arrive promptement à l'opacité complète. Telle est l'explication des effets produits par les corps opaques, car chacun d'eux, pris sous une très-petite épaisseur, se comporte comme un corps transparent. On peut citer comme exemples les effets produits par les métaux : une lame métallique de $\frac{1}{2}$ ou de $\frac{1}{4}$ de millimètre, quelle que soit sa nature, intercepte complétement les rayons solaires directs, mais en diminuant son épaisseur, quand celle-ci se trouve réduite à une fraction de millième de millimètre, alors la transmission de la lumière peut avoir lieu. Bien plus, on observe des effets de coloration du même genre qu'en agissant avec les solides et les liquides transparents, ce qui montre que chaque métal exerce une action différente sur les divers rayons lumineux; ainsi l'or battu en feuilles très-minces, déposé sur une lame de verre afin de pouvoir être observé, est vert par transmission, tout en conservant sa couleur jaune par réflexion, tandis que l'argent, quoique plus absorbant que l'or, en couche suffisamment mince et dans les mêmes conditions paraît bleu (1).

Ces effets de coloration des lames métalliques très-minces dépendent de l'état physique dans lequel se trouvent les métaux : Faraday a reconnu (2) qu'une feuille d'or battu suffisamment mince n'est verte par transparence que parce qu'elle est écrouie; si cette lame est placée sur du verre afin de pouvoir être recuite, et qu'elle soit portée à la température rouge, après cette action, elle paraît d'une teinte rouge ou violet rouge plus ou moins pâle, suivant son épaisseur, absolument comme le verre coloré en rouge par l'or. En comprimant de nouveau la feuille d'or, elle redevient verte par transmission. Dans chaque cas, elle ne cesse jamais d'être jaune par réflexion.

(1) M. de la Provostaye et Desains ont observé que si les rayons calorifiques incidents sur une surface enduite de noir de fumée ont l'incidence rasante, les rayons diffusés transmis ont le même plan de polarisation que les rayons incidents, tandis qu'avec une lame d'or dans les mêmes conditions les rayons émergents ont leur plan de polarisation perpendiculaire au plan d'incidence, comme lors de la transmission par réfraction (*Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 34, p. 226).

M. Knoblauch en opérant avec la chaleur rayonnante a montré que la transmission au travers des lames métalliques se faisait dans des conditions analogues à celle qui a lieu au travers des écrans diathermanes (*Ann. de Pogg.*, t. 101, p. 161. *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série. t. 51, p. 503, 1857).

Voir aussi par la transmission de la lumière au travers de l'argent, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 63, septembre 1866.

(2) *Transact. philosoph.*, t. 147, p. 145, 1857. — *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 53, p. 60.

Faraday a observé encore que les autres métaux présentent des effets analogues, quoiqu'à des degrés différents : l'argent donne une teinte brune quand le métal est recuit, et une couleur bleue quand la couche métallique est comprimée; le cuivre est rouge par réflexion et vert par transmission, quel que soit son degré de recuit ou d'écrouissage. Les autres métaux donnent des effets qui se rapprochent soit de ceux de l'or et de l'argent, soit de ceux du cuivre, c'est-à-dire que pour quelques-uns l'écrouissage change les conditions de transmission de la lumière, tandis que pour d'autres il ne les modifie pas.

Il résulte des mêmes observations que l'or en suspension dans les liquides les colore en rouge ou en violet, suivant les circonstances, et que la lumière transmise se comporte comme ayant traversé un écran transparent; le passage de la lumière a donc lieu au travers des particules métalliques.

On a supposé que les corps incolores ou colorés étaient diaphanes et que la lumière qui n'était pas absorbée les traversait librement; mais il n'y a pas de corps absolument transparent et leurs particules projettent de la lumière diffuse dans tous les sens, soit en avant du côté d'où vient la lumière, soit au delà, c'est-à-dire par transmission. Ainsi une lame de verre ou une couche d'eau placées sur le trajet d'un faisceau lumineux que l'on introduit dans une chambre noire, et vues de côté, donnent une certaine diffusion tout autour des points frappés par les rayons directs. Ces rayons diffusés peuvent provenir, dans quelques cas, des effets de phosphorescence dont on a déjà parlé dans le premier volume (1); mais dans la plupart des circonstances ils sont dus à une réflexion de la lumière sur les particules du milieu éclairé.

Quand les matières sont hétérogènes, cette diffusion augmente beaucoup, et les corps ne sont plus que translucides ou troubles sous une petite épaisseur, et quand leur épaisseur devient plus grande, de même que les métaux ils sont complétement opaques. Telles sont les matières organiques comme l'ivoire, le bois, le papier, etc.

On a fort peu étudié les phénomènes de diffusion des rayons lumineux, si ce n'est pour reconnaître la direction du plan de polarisation suivant l'inclinaison des rayons incidents sur un écran translucide comme le papier, le carton, l'ivoire, un métal dépoli, ou bien selon la position des rayons diffusés. Les observations faites avec les rayons

(1) Voir tome 1er, page 316.

calorifiques ont montré à Melloni (1) que les corps placés dans les mêmes conditions diffusent inégalement les rayons différemment réfrangibles. Ce physicien a reconnu qu'en général les corps blancs diffusent fortement les rayons très-réfrangibles et faiblement les rayons peu réfrangibles émanant de sources à basses températures. Ce résultat explique pourquoi les rayons les moins réfrangibles sont transmis avec plus d'intensité par certains corps translucides blancs, et pour quel motif quand leur épaisseur augmente ces matières paraissent jaunâtres ou rougeâtres avant de devenir opaques; tels sont la magnésie maintenue en suspension dans l'eau, le lait, etc. La diffusion qui est très-forte pour les rayons très-réfrangibles fait paraître ces corps blancs et même bleuâtres par réflexion, et jaunâtres par transmission. En effet, la lumière transmise comprènd celle qui échappe à la diffusion par réflexion ainsi qu'à l'absorption; plus cette diffusion est grande, plus la partie transmise est faible à égalité d'absorption, et vice-versa; en outre, la couleur des rayons diffusés est complémentaire de celle des rayons transmis.

Il est facile de voir que selon la proportion relative de lumière diffusée ou transmise, un même corps peut devenir plus ou moins translucide; ainsi, en introduisant dans une matière hétérogène trouble ou peu translucide une substance dont l'indice de réfraction se rapproche plus de l'indice de la matière que celui de l'air, la proportion de la lumière diffusée est moindre et la quantité de lumière transmise est plus grande, à égalité d'épaisseur. Tel est l'effet qui se produit quand on mouille du papier ou mieux qu'on l'imbibe d'huile ou de vernis; la nuance du corps ne change pas s'il n'est pas sensiblement coloré.

Si le corps est en poudre, il en est de même, mais la nuance de la poudre peut changer s'il s'agit d'un corps coloré. En effet, de la poudre de verre coloré ou d'une substance transparente sous une faible épaisseur, quand elle est sèche, tend à paraître plus blanche si la poussière est fine; car la lumière diffusée à la surface des particules est blanche si le pouvoir de diffusion est le même pour tous les rayons lumineux, et il n'y a que celle qui pénètre à une certaine profondeur qui se nuance de la couleur du corps. Dans le cas ou cette poussière est humectée d'eau ou d'huile, alors la quantité de lumière diffusée est moindre et il arrive plus de lumière d'une certaine profondeur; la poudre devient donc plus

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 2e série, t. 75, p. 337, (1840).

sombre, car la partie lumineuse absorbée augmente, et en même temps la nuance change si le corps est coloré. On peut citer à l'appui de cette explication ce fait que de la poussière de verre coloré paraît plus blanche quand elle est plus fine et devient plus sombre quand on la mouille; en outre, dans ce dernier cas sa couleur se rapproche d'autant plus de celle du verre que les fragments sont plus gros. S'il s'agit de corps très-absorbants placés dans les mêmes conditions, comme le minium, les précipités métalliques, etc..., les différences sont moins grandes (1).

La translucidité du bois donne lieu à un effet curieux : des planches de sapin de 1 à 2 millim. d'épaisseur, vues par transmission au moyen d'une forte lampe ou d'un faisceau de rayons solaires, paraissent d'une nuance jaune orangé. Si la planche renferme des nœuds, dont la direction des parties ligneuses, comme on le sait, est perpendiculaire au plan de la planche, et si les nœuds sont imprégnés de sève résineuse, ils paraissent beaucoup plus translucides que le reste de la planche et prennent par transmission une teinte orangée plus vive et plus intense. Dans ces conditions une planche de sapin épaisse de 1 à 2 centimètres est sensiblement opaque, et n'est translucide qu'aux endroits où se trouvent les nœuds; là elle donne par transmission une belle couleur orangée. Si les nœuds ont perdu leur sève ou leur résine, ils ne diffèrent pas sensiblement du reste de la planche.

Le noir de fumée, d'après Melloni (2), diffuse également les rayons de toute réfrangibilité quoique très-faiblement. Il a encore observé que cette matière placée en couche très-mince sur la surface d'un écran en sel gemme, arrête les rayons les plus réfrangibles, mais laisse passer la partie la moins réfrangible de l'image prismatique, en sorte que la lame de sel enfumé est presque aussi transparente pour les rayons provenant des sources calorifiques obscures, c'est-à-dire pour les rayons infra-rouges, que lorsqu'elle est blanche et limpide.

Les divers principes énoncés plus haut rendent compte des faits relatifs à la couleur des corps et à leur transparence, et cela indépendamment de toute théorie. Newton (3) a proposé une explication des couleurs par le phénomène des lames minces, laquelle suppose que les particules des corps translucides ou opaques sont assez transpa-

(1) Helmholtz, *Optique physiologique;* Paris, 1867, page 363.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 9, p. 315 (1839).
(3) Newton, *Traité d'optique*, livre 2, 3e partie.

rentes pour que la lumière qui les frappe éprouve des réflexions tant à son entrée qu'à sa sortie. D'après cette hypothèse, et suivant la théorie des ondulations on expliquerait de la manière suivante, par un effet d'interférence, les couleurs des milieux translucides en supposant que toutes les particules aient les mêmes dimensions (1) : si dans un milieu homogène se trouve un corps d'une épaisseur infiniment petite dans lequel la lumière pénètre et si les rayons se réfléchissent à l'entrée et à la sortie, la différence de chemin parcouru est nulle, mais, par le fait de la différence de réflexion, les deux rayons sont en retard l'un sur l'autre d'une demie ondulation; les deux rayons alors se détruisent, et l'on peut dire qu'il n'y a pas de réflexion et que la totalité de la lumière est transmise. Lorsque le corps a une épaisseur sensible, alors la différence de route est plus grande, la destruction du faisceau moins complète, et l'épaisseur augmentant, il arrive un moment où la différence des distances parcourues par la lumière est une demi-longueur d'onde, et où le retard des deux rayons, par le fait de la réflexion dans deux plans à angle droit, est une longueur d'onde complète; on a alors le maximum de clarté par réflexion. On voit que les rayons lumineux dont la longueur d'onde est la plus courte, c'est-à-dire les rayons violets et bleus, seront réfléchis les premiers en plus grande abondance et par conséquent manqueront les premiers pour la transmission; la teinte par transmission du milieu translucide devra donc paraître celle des rayons de plus grande longueur d'onde, c'est-à-dire jaunâtre ou rougeâtre.

Cette hypothèse ne saurait expliquer seule les effets de coloration observés, car l'absorption de la lumière par les corps dépend de la nature de ceux-ci, et, comme on l'a vu précédemment, chacun d'eux absorbe des parties différentes du spectre solaire; la coloration des milieux translucides ou troubles ne tient donc pas seulement à un phénomène d'interférence. En général, les effets ont lieu dans le sens qui vient d'être indiqué, c'est-à-dire que ce sont les rayons les moins réfrangibles qui sont les moins absorbables; mais la teinte plus ou moins jaune ou rouge par transmission de la matière translucide dépend de la couleur de celle-ci. On a vu, en effet, que le papier conservait sensiblement la teinte blanche quand son opacité augmentait; l'ivoire paraît être à peu près dans les mêmes conditions; le lait, la magnésie en suspension dans l'eau donnent à la lumière diffusée par réflexion une

(1) E. Brücke, *Ann. de Poggendorf*, t. 88, p. 63 (1852).

teinte bleuâtre et à la lumière transmise une teinte jaunâtre; le bois de sapin, comme on l'a vu plus haut, est orangé. On suppose bien entendu que la diffusion a lieu sans produire de phosphorescence et sans transformation de mouvement vibratoire; autrement, les effets de coloration se compliquent des phénomènes qui ont été étudiés dans la première partie, tome 1er, page 316 et suivantes. Quant aux couleurs naturelles des corps, tels que les précipités métalliques ainsi que les couleurs végétales, elles sont dues à la réflexion ou à la transmission des rayons qui ne sont pas absorbés par ces corps.

Les masses gazeuses donnent lieu à des effets de diffusion analogues aux précédents, et l'atmosphère qui enveloppe la terre et la sépare des espaces planétaires, interposée entre les astres lumineux et un observateur, forme comme un voile qui réfléchit en tous sens la lumière en donnant lieu à un grand nombre de phénomènes optiques remarquables. C'est par suite de la diffusion de la lumière sur les molécules atmosphériques que les diverses régions du globe ne sont pas plongées tout à coup dans les ténèbres lorsque le soleil quitte l'horizon; de sorte que l'air qui s'oppose à ce que la terre, après le coucher du soleil, soit exposée à un refroidissement considérable pendant la nuit, en réfléchissant les rayons lumineux dans tous les sens, rend visibles les objets qui ne sont pas directement éclairés par cet astre.

La teinte bleue du ciel provient de la réflexion des rayons lumineux sur les particules d'air; elle indique un pouvoir diffusif plus grand de ces particules pour les rayons bleus. Cette couleur est du reste modifiée par la présence des vapeurs, des nuages, et des corps étrangers qui sont en suspension dans l'air. Il résulte de ce fait, et de ce qui a été dit précédemment, que les rayons les plus réfrangibles doivent être éteints de préférence quand la lumière blanche traverse une certaine épaisseur de l'atmosphère; ainsi, dans ce cas, les rayons jaunes et rouges doivent subir une moindre diminution d'intensité (1). C'est de cette manière que l'on explique les couleurs des astres près de l'horizon, ainsi que les teintes de l'aurore et du crépuscule. D'après les mêmes motifs il est permis de supposer que parmi les rayons émanés du soleil, il y a des rayons ultra-violets qui sont absorbés par l'atmosphère et qui n'arrivent pas jusqu'à nous.

Ces détails suffisent pour montrer que les phénomènes d'absorption

(1) L. Reynaud, *Mémoire sur le balisage et l'éclairage des côtes de France*, 1864.

ou d'extinction de lumière qui ont déjà conduit à des découvertes importantes, comme on l'a vu dans le premier volume, peuvent donner des indications précieuses sur la nature et sur l'état physique des corps ainsi que sur le mode d'action de l'agent lumineux.

En terminant ce rapide exposé et avant de parler des effets physiques, chimiques et physiologiques produits par la lumière, on doit ne pas perdre de vue qu'à l'époque actuelle, où l'action calorifique centrale n'intervient plus dans les phénomènes de la vie sur la terre, et où les variations des saisons sont dues à l'influence solaire (1), le principe de l'équivalence des forces physiques conduit à cette conséquence que toute source de force vient du soleil. C'est par l'action calorifique et chimique de ses rayons que la vie organique peut avoir lieu et que le carbone est accumulé dans les végétaux, lequel étant brûlé dans nos foyers devient notre principale source de chaleur. Ainsi l'action des rayons solaires s'emmagasine pour ainsi dire et ne se traduit au dehors que lors de la transformation des produits que son influence a fait naître.

(1) Voir Becquerel et Ed. Becquerel, *Traité de physique terrestre et de météorologie*, page 38 et suivantes (1847).

LIVRE PREMIER.

EFFETS CALORIFIQUES.

CHAPITRE PREMIER.

Phénomènes généraux. — Appareils employés.

§ 1er. *Effets généraux. Miroirs ardents, Lentilles.*

Quand on se trouve exposé aux rayons du soleil ou à ceux d'un foyer brillant, l'effet le plus immédiat que l'on peut constater est la sensation de chaleur que l'on éprouve et l'élévation de température des corps soumis à l'influence de ces rayons. L'action calorifique augmente quand on reçoit sur un miroir concave ou sur une lentille convergente une certaine quantité de rayons qui viennent se réunir vers leur foyer, et les rayons solaires peuvent devenir alors une de nos plus puissantes sources de chaleur.

D'après quelques passages d'auteurs grecs et latins, la propriété que possèdent les lentilles de verre et les miroirs concaves de concentrer la chaleur, comme la lumière, dans les points où convergent les rayons solaires était fort anciennement connue. Ainsi il paraît qu'Aristophane dans une de ses comédies (1) propose de fondre des tablettes en cire au moyen d'une boule de verre exposée au soleil. Pline, dans son histoire naturelle, dit que « des boules de verre remplies d'eau, opposées « aux rayons du soleil, s'échauffent tellement qu'elles brûlent les étof-

(1) *Encyclopédie*, édition originale in-fol, t. Ier, p, 624. Article, Miroirs ardents. Dutens, *Recherches sur l'origine des découvertes*..., t. 2, p. 138 ; Paris, 1766.

fes (1) ». Et plus loin, « Je lis chez des médecins que le meilleur cau-« tère est une boule de cristal recevant les rayons du soleil (2) ».

Les propriétés des miroirs courbes étaient également connues vers cette époque, car Plutarque, en parlant de Numa (3), dit que dans le temple de Delphes et à Athènes quand le feu sacré vient à s'éteindre, les prê-tresses en allument un tout nouveau « en tirant du soleil une flamme « pure et nette par le moyen de certains vases d'airain concaves et « taillés selon la section conique en triangles rectangles, de manière « que toutes les lignes de la circonférence aboutissent à un point du « centre. On les expose au soleil; tous les rayons se rassemblent et se « réunissent dans ce seul point, et prenant corps et force de feu par la « reverbération, ils subtilisent et enflamment si fort l'air, qu'il embrase « très-promptement la matière sèche et aride qu'on lui présente ». Cette description se rapporte évidemment à un miroir de forme concave construit au moyen de miroirs plans d'airain.

Si l'on en croit les récits de quelques historiens, ce fut par l'emploi de miroirs de ce genre qu'Archimède incendia à distance la flotte ro-maine lors du siége de Syracuse par Marcellus, l'an 212 avant J.-C. Ce fait a été revoqué en doute, non-seulement en raison des dimensions que l'on devait supposer à ces miroirs, mais encore parce que plu-sieurs des auteurs anciens qui ont parlé d'Archimède n'en ont pas fait mention. Aussi Dacier, traducteur de Plutarque, a-t-il émis l'opinion suivante (4) : « Il faut remarquer en passant que ni Polybe, ni Tite-« Live, ni Plutarque ne disent pas un mot des miroirs ardents avec « lesquels on prétend qu'Archimède brûlait les vaisseaux des Ro-« mains; c'est une tradition moderne qui n'a nul fondement. »

Descartes (5), en examinant l'étendue que doit avoir un miroir con-cave pour produire la combustion à une distance déterminée, a nié la possibilité du fait; car, dit-il : « Ces miroirs dont on a dit qu'Archimède « brûlait des navires de fort loin, devaient être extrêmement grands, « ou plutôt ils sont fabuleux ».

(1) Pline, livre 36, ch. 67. « Quum addita aqua vitreæ pilæ sole adverso, in tantum ex-candescant, ut vestes exurant. »

(2) Id., livre 37 ch. 10. « Invenio apud medicos, quæ sunt urenda corporum, non aliter utilius id fieri putare, quam cristallina pila adversis opposita solis radiis. »

(3) Les *Vies des hommes illustres* de Plutarque, tradition de Dacier, t. 1, p. 307-1721.

(4) Id., t. 3, page 200, en note.

(5) *Dioptrique*, discours 8[e], édition publiée par Cousin, t. 5, p. 117.

A peu près à la même époque le père Kircher (1) traita la même question, et crut à la possibilité du fait. Il rappela que deux auteurs grecs du douzième siècle, Tzetzès et Zonare, avaient parlé des propriétés des miroirs ardents dont Archimède et Proclus avaient fait usage. D'après Tzetzès, « lorsque les vaisseaux romains furent à la portée du mi-
« roir, Archimède fit faire une espèce de miroir hexagone et d'autres
« plus petits de 24 angles chacun, qu'il plaça dans une distance pro-
« portionnée, et qu'on pouvait mouvoir à l'aide de leurs charnières et
« de certaines lames de métal; il plaça le miroir hexagone de façon
« qu'il était coupé par le milieu par le méridien d'hiver et d'été en sorte
« que les rayons du soleil reçus sur ce miroir, venant à se briser, allu-
« mèrent un grand feu qui réduisit en cendres les vaisseaux romains
« quoiqu'ils fussent éloignés de la portée d'un trait ». Zonare rapporte qu'au siége de Constantinople, sous l'empire d'Anastase Ier, l'an 514 de J.-C., Proclus brûla avec des miroirs d'airain la flotte de Vitalien qui assiégeait Constantinople; il ajoute que les miroirs étaient une découverte ancienne, et que l'historien Dion en attribue l'honneur à Archimède, qui s'en servit contre les Romains au siége de Syracuse.

Le père Kircher dit ensuite qu'à la place de miroirs courbes on peut se servir de miroirs plans juxtaposés et inclinés l'un sur l'autre, et donne une description (2) de la manière dont on peut les ajuster pour produire une forte chaleur par la réunion des images du soleil.

Jusque là on s'était borné à discuter la possibilité du fait sans essayer de le reproduire par expérience. Buffon, au milieu du siècle dernier (3), entreprit des recherches pour éclaircir ce point historique, pensant que si Archimède avait produit l'inflammation à distance, c'était au moyen de miroirs plans en métal poli et non de miroirs courbes. Il commença par montrer que, contrairement à l'assertion de Descartes, de grands miroirs produisent toujours plus d'effet que les petits, car si théoriquement une même étendue de foyer reçoit la même quantité de rayons dans l'un et l'autre cas, cependant, quand une surface plus grande est échauffée au même degré qu'une plus petite, la déperdition de la chaleur par conductibilité est moindre dans le premier cas que dans le second. Il fit construire ensuite un miroir formé de 168 glaces planes étamées, chacune d'elles ayant 6 pouces sur 8 pouces et étant inclinée l'une sur

(1) *Ars magna lucis et umbræ, Romæ*, 1645, livre 10, partie 3e, chap. Ier, p. 874.
(2) Ibid., page 887.
(3) *Mémoires de l'Académie des sciences,* t. 65, page 82, 1747, et t. 66, p. 305.

l'autre de façon à ce qu'elles puissent agir comme des éléments d'un miroir courbe, et, suivant l'inclinaison des miroirs, réfléchir les rayons solaires sur une même surface à des distances diverses.

Au moyen de cette construction il put faire tomber sur le même point les 168 images du soleil formées par les miroirs plans et brûler des matières combustibles à des distances de 20, 30 et 150 pieds (ou 50 mètres). Dans la première expérience, qu'il fit le 23 mars 1747, il mit le feu à 66 pieds de distance à une planche de hêtre goudronnée, avec 40 glaces, c'est-à-dire avec $\frac{1}{4}$ du miroir. Dans une des suivantes, le 16 avril, il mit le feu à une planche de sapin goudronnée à 150 pieds (50 mètres) avec 128 glaces; l'inflammation fut très-subite et se fit dans toute l'étendue du foyer, qui avait environ 16 pouces de diamètre à cette distance. Plus tard, en 1749 et 1750, il fit construire un autre miroir de 360 glaces, dont chacune avait 4 pouces de largeur et de hauteur (c'est-à-dire de 10 à 11 centimètres).

Buffon, après avoir rapporté plusieurs expériences de fusion faites avec les miroirs, notamment la fusion de lames d'étain, d'argent et l'incandescence d'une plaque de tôle, dit que sans avoir l'espérance de brûler à de grandes distances, cependant on aurait pu aisément en augmentant le nombre des miroirs brûler des matières inflammables à des distances de 300 et de 600 pieds, c'est-à-dire à 100 ou 200 mètres.

Ainsi, ces expériences montrent la possibilité du fait attribué à Archimède dans le cas seulement où la combustion aurait eu lieu à une distance n'excédant pas 100 à 200 mètres; plus loin, cela n'aurait pas été possible. On ne sait pas si à cette époque les miroirs de verre étaient en usage, bien que, deux siècles et demi après, Pline ait dit (1) : « Jadis Sidon était célèbre par ses verreries; on y avait même inventé des miroirs de verre; » mais Archimède aurait pu faire usage de miroirs métalliques plans.

Parmi les miroirs ardents un peu puissants que l'on ait construits, et qui cependant ne donnaient pas l'inflammation des matières combustibles à une aussi grande distance que celui de Buffon, on peut citer ceux de Septala, chanoine de Milan, de Villette et de Tschirnhausen; celui de Septala brûlait à une distance de 15 ou 16 pas (15 ou 16 mètres). Zahn rapporte également qu'en 1699, à Vienne, un nommé Neumann

(1) Pline, livre 36-66. « Sidone quondam in officiis nobili : si quidem etiam specula excogitaverat. »

construisit un miroir en carton qui liquéfiait aisément les métaux à son foyer sous l'action des rayons solaires (1).

Actuellement les expériences d'incandescence et de fusion au moyen des rayons solaires convergents et réunis à une petite distance des appareils se font avec des miroirs sphériques en métal ou en verre argenté, ou plus facilement en se servant de lentilles de convergence. Les rayons solaires réfractés par une lentille doivent donner au foyer une image du disque solaire, dont l'étendue angulaire est d'environ $\frac{1}{2}$ degré, angle sous lequel nous voyons cet astre; la dimension de la surface de cette image dépend donc du diamètre de la lentille. D'un autre côté, l'aberration de sphéricité donne plus d'étendue à cette image, et en augmentant l'ouverture de la lentille on augmente aussi l'étendue de la surface focale, et on ne produit pas en chaque point une plus grande élévation de température; cependant, comme on l'a fait observer plus haut, le refroidissement étant moindre quand on se sert d'un grand miroir ou d'une grande lentille, il y a avantage à faire usage d'appareils d'une certaine dimension, qui peuvent permettre de porter à la fusion ou à l'incandescence de plus grandes quantités de matière.

Buffon (2) s'est également occupé de la construction des lentilles de verre destinées à produire des combustions; comme il avait observé la diminution d'intensité des rayons due à l'épaisseur des lentilles quand elles sont un peu grandes, il eut l'idée de la construction de lentilles à échelons, dont les parties annulaires ont le même foyer que la partie centrale, qui se trouve ainsi avoir une épaisseur restreinte. On sait tout le parti que Fresnel (3) a tiré de la construction de ces lentilles pour l'installation des appareils de phares et de la belle industrie dont ce physicien a doté la France. Au lieu de construire ces lentilles par fusion comme le proposait Buffon, il les a formées par parties séparées.

La fig. 40 représente une lentille à échelons disposée suivant le système de Fresnel et appartenant au Conservatoire des arts et métiers; son diamètre est de 70 centimètres et sa distance focale est de 1 mètre.

(1) *Encyclopédie*, article déjà cité. Voir aussi, pour l'antiquité des miroirs, *Amusements philosophiques*, etc., par le père Abat; Paris, 1763, page 433. Dutens, *Recherches sur l'origine des découvertes*, 1766; Montucla, *Histoire des mathém.*, t. 3, p. 525 et suiv. 1802.

(2) *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. 66, p. 305.

(3) Fresnel, *Mémoire sur un nouveau système d'éclairage des phares*, lu à l'Académie des sciences, le 29 juillet 1822. Voir *Mém. sur l'éclairage et le balisage des côtes de France*, par M. L. Reynaud, Paris, 1864, page 361.

Les parties annulaires ont sensiblement le même foyer que la lentille centrale; ce foyer consiste en un espace d'une certaine étendue se trouvant au milieu de la partie cylindrique AB, qui est supportée par les tiges latérales.

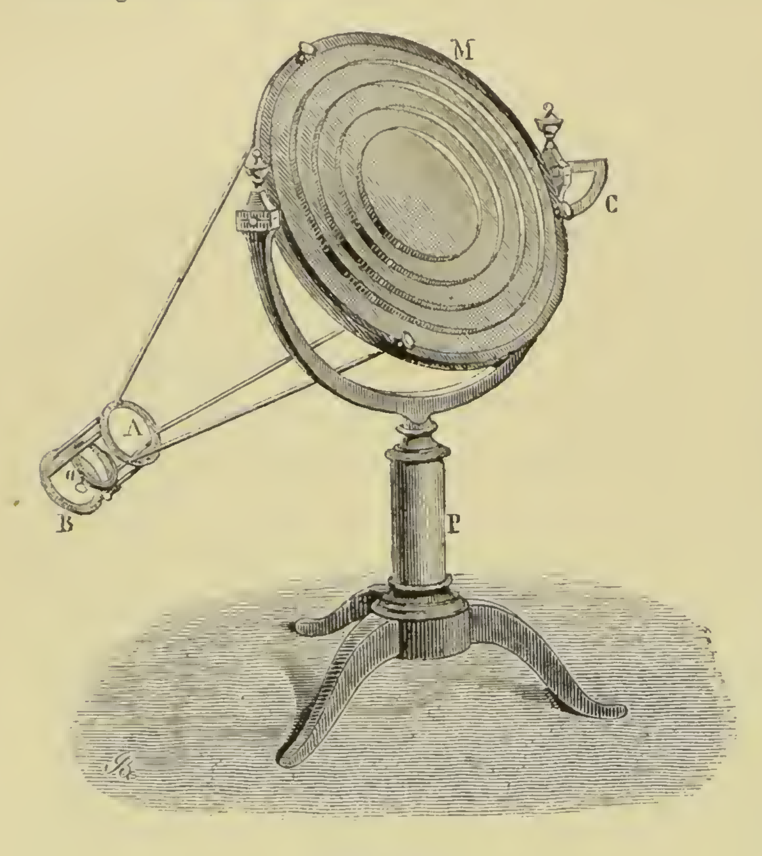


Fig. 40.

Pour opérer avec cet appareil, on le tourne et on l'incline au moyen du quart de cercle C, de façon à ce que les rayons solaires tombent perpendiculairement sur sa surface M, puis l'on approche les corps sur lesquels on veut agir de la partie centrale *a* de l'espace cylindrique AB, où se trouve le foyer des diverses parties de la lentille. On reconnaît alors que les métaux les plus réfractaires, comme le platine, l'iridium sont rapidement fondus, et que le charbon est porté à une incandescence qui n'est comparable qu'à celle que peut produire l'arc voltaïque.

On doit observer que l'action de cette source calorifique est nécessairement limitée par la température de la source rayonnante, c'est-à-dire du soleil, température qui ne saurait être dépassée, à moins d'admettre l'influence de l'intensité des rayons dans l'effet calorifique produit, comme on le dira dans le 3e paragraphe du second chapitre de ce livre; on a pu voir dans le premier volume, p. 122, que la limite extrême de 2000 à 2100 degrés ne saurait être dépassée, en supposant que la température de la photosphère solaire ne s'écarte pas beaucoup de celle que l'on obtient entre les charbons polaires d'une pile voltaïque.

Les sources brillantes ne sont pas les seules qui produisent de la chaleur par voie de rayonnement; les sources obscures donnent lieu à

des effets du même genre. Ainsi, les masses de fer échauffées au-dessous de 500°, les métaux comme le plomb, l'étain, qui sont à leur point de fusion, rayonnent à distance et agissent sur les thermoscopes et les thermomètres, mais n'influencent pas la rétine. Un corps, quel que soit son état calorifique, à la température ambiante comme à de très-basses températures, rayonne de la chaleur ainsi que Prévost de Genève l'a énoncé le premier, et le rayonnement entre les corps placés dans une même enceinte conduit à l'équilibre de leur température; c'est une conséquence nécessaire de l'hypothèse dynamique de la chaleur.

On A déjà vu dans le Ier volume, livre III, page 64 et suiv., en parlant des sources de lumière par l'action de la chaleur, que si l'on considère un centre de rayonnement dont la température s'élève, on observe plusieurs effets bien distincts :

1° A partir d'une limite déterminée de température, l'émission lumineuse devient sensible; cette limite est environ de 480 à 500° centigr.

2° Aux rayons émis à une température donnée viennent s'ajouter de nouveaux rayons de plus en plus réfrangibles.

3° A mesure que la température croît, l'intensité augmente pour chaque groupe de rayons de diverse réfrangibilité.

Il en est encore de même pour les rayons émis à basse température, et qui n'ayant pas d'action sur la rétine ont été nommés rayons obscurs; à chaque température correspond une limite supérieure de la réfrangibilité des rayons émis, et chacun de ces rayons différemment réfrangibles a une intensité correspondant à cette température. Du reste, ces rayons suivent les mêmes lois que celles qui régissent les propriétés des rayons de lumière; ils se réfléchissent, se réfractent, se transmettent, se polarisent, interfèrent comme eux, conséquence d'une origine commune. Il n'est donc pas utile de décrire les phénomènes qui s'y rapportent, et il n'est pas nécessaire de s'y arrêter du moment que l'on admet l'identité des causes productrices de la chaleur et de la lumière. De même, il n'a pas été question des propriétés analogues de la lumière, puisque ce sujet est traité habituellement dans les ouvrages d'optique et sort du cadre que je me suis tracé.

§ 2. *Appareils thermo-électriques.*

On s'est borné pendant longtemps à faire usage des thermomètres à air ou à liquide pour l'étude du rayonnement de la chaleur, et l'on a pu

voir dans le premier volume, livre IV, page 143, le parti que l'on a pu tirer du thermomètre à air, à réservoir très-petit, pour observer la distribution de la chaleur dans le spectre solaire (1); mais depuis que Nobili et Melloni (2) ont construit une pile thermo-électrique d'une grande sensibilité, cet instrument est devenu indispensable pour les expériences sur la chaleur rayonnante (3); Melloni a même fait toutes ses recherches au moyen de cet instrument. La pile thermo-électrique représentée

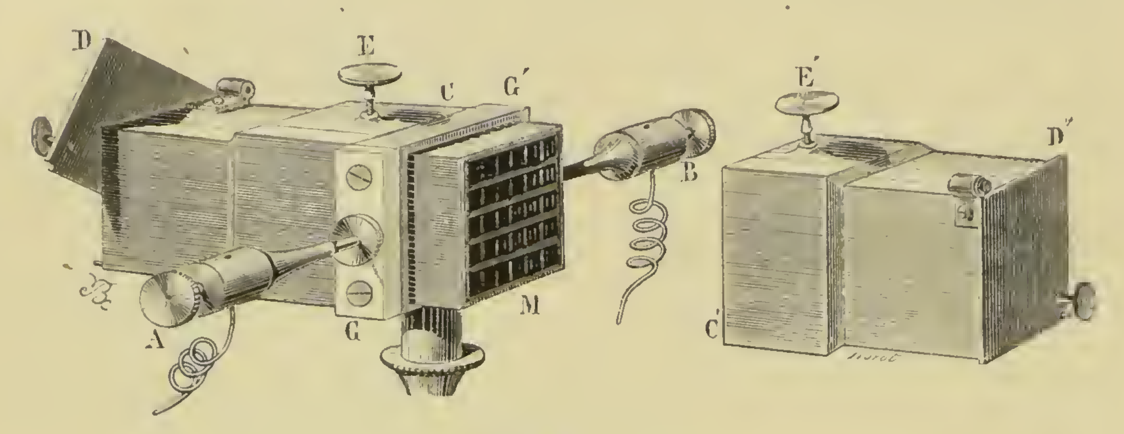


Fig. 41.

fig. 41 se compose ordinairement d'un certain nombre de barreaux de bismuth et d'antimoine, placés parallèlement les uns aux autres et formant un faisceau prismatique M, dont la longueur est de 2 cent. et la section telle que le côté du carré qui la compose est de 12 millim.;

(1) J'ai employé, pour des recherches que le temps ne m'a pas permis de compléter, une disposition telle qu'un petit thermomètre à gaz peut devenir très-sensible; elle consiste à construire le réservoir de façon à ce qu'il contienne un fragment de charbon de bois bien recuit; on remplit le thermomètre de gaz acide carbonique, dont le charbon absorbe 30 à 35 volumes, puis on introduit dans la tige du thermomètre une petite colonne d'un liquide qui n'absorbe pas le gaz, comme l'acide sulfurique. Les changements calorifiques font éprouver à cet appareil des variations de volume assez grandes, qui ne sont pas proportionnelles aux différences de température, mais qui peuvent être utiles dans des circonstances déterminées.

(2) *Bibliothèque univ. de Genève*, 1re série, t. 37, p. 119 (1830). *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 48, p. 198.

(3) En 1823, Fourier et Œrsted (*Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. 22, p. 475), avaient eu l'idée de construire des piles thermo-électriques avec des barreaux de bismuth et d'antimoine soudés bout à bout; ces piles n'eurent aucune application.

En 1826, M. Becquerel (*Ann. de chim. et de phys.*, 2e série, t. 33, p. 371) a fait usage des courants thermo-électriques pour déterminer la température soit des flammes, soit des fourneaux, et plus tard celle des parties intérieures des animaux, ainsi que celle du sol à diverses profondeurs.

Nobili et Melloni, en 1830 (voir la citation précédente), ont fait usage des piles thermo-électriques, ainsi que des principes précédents, pour l'étude de la chaleur rayonnante.

les deux faces terminales sont noircies. Les barreaux de bismuth qui se succèdent alternativement avec ceux d'antimoine sont soudés à leurs extrémités de deux en deux, et séparés dans toute leur longueur par du papier ou une autre substance isolante très-mince. Au premier et au dernier barreau sont soudés des fils de cuivre qui viennent aboutir à l'une des chevilles A et B de même métal, passant à travers un morceau d'ivoire fixé sur l'anneau GG'. L'intervalle compris entre cet anneau et la pile est rempli de matière isolante. Les extrémités libres de ces deux fils sont mises en communication avec les deux bouts du fil d'un multiplicateur indiquant, par les déviations de l'aiguille aimantée, si la température d'une des faces de la pile s'élève ou s'abaisse par rapport à celle de l'autre face. En effet, une des faces est formée de toutes les soudures de rang pair, l'autre de celles de rang impair.

A l'aide de tubes de cuivre CD, C'D', on garantit les faces de la pile des rayonnements latéraux, et les rayons venant directement sur un des côtés de la pile agissent seuls. C'est en disposant cet appareil sur une règle divisée qui porte les sources lumineuses, les écrans, les réflecteurs, etc., destinés aux expériences que l'on a en vue d'exécuter, que l'on a pu étudier les différentes circonstances du rayonnement de la chaleur.

J'ai montré (1) comment on pouvait substituer au bismuth et à l'antimoine, dans les piles, des alliages dont le pouvoir thermo-électrique est supérieur à celui de ces métaux et avoir une sensibilité plus grande. Au lieu de bismuth il est préférable d'employer un alliage composé de dix parties de bismuth et de une d'antimoine, alliage dont la force électromotrice est supérieure à celle du bismuth et qui présente une régularité remarquable dans la manifestation des effets thermo-électriques.

Au lieu d'antimoine, il y aurait avantage à se servir de tellure; mais cette matière étant très-rare, on peut avoir recours à un alliage d'antimoine et de cadmium à équivalents égaux. Cet alliage est plus cassant que l'antimoine. Mais en prenant celui qui renferme une quantité de bismuth comprise entre $\frac{1}{20}$ et $\frac{1}{10}$ de son poids, on le rend assez résistant. Celui que je conseille est formé de :

Antimoine 806 }
Cadmium 696 } équivalents chimiques égaux.

Bismuth entre $\frac{1}{20}$ et $\frac{1}{10}$ en poids du mélange précédent.

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 4e série, t. 8, p. 385 (1866). — *Ann. du Conservatoire impérial des arts et métiers*, t. 6, p. 593.

On fond d'abord l'antimoine (1) dans un creuset; on ajoute ensuite le cadmium et le bismuth, le bain métallique étant couvert d'une légère couche de charbon pulvérisé; puis on coule l'alliage aussitôt que la fusion est opérée.

Les couples formés avec les alliages précédents ont une force électromotrice plusieurs fois aussi considérables que les couples bismuth antimoine; aussi les piles construites de cette manière sont-elles beaucoup plus sensibles pour les effets de rayonnement que les piles ordinaires.

Quand on veut étudier le rayonnement calorifique d'un faisceau de rayons d'une petite épaisseur, comme par exemple lorsqu'il s'agit de la comparaison des effets des différentes parties du spectre solaire, on forme alors une pile avec huit ou dix couples disposés sur un seul rang, de manière à présenter une ligne d'une longueur de 12 à 15 millim. sur une largeur égale à l'épaisseur des barreaux; en outre, un écran rectiligne placé en avant de la pile limite la largeur du faisceau actif.

CHAPITRE II.

Analyse par réfraction des rayons calorifiques.

§ 1. *Spectre calorifique.*

On a vu dans le livre I[er] du premier volume, page 29, qu'en 1800 William Herschell (2) découvrit que les rayons les moins réfrangibles du spectre solaire, les rayons rouges, donnent une élévation de température plus grande que les rayons bleus, et même qu'en dehors du rouge, dans la partie invisible du spectre moins déviée que le rouge, le thermomètre indique encore une élévation de température. Un faisceau de rayons solaires contient donc des rayons de moindre réfrangibilité que les rayons visibles, que l'on a nommés rayons obscurs, et dont le pou-

(1) L'antimoine doit être aussi pur que possible. Quand on se sert de celui du commerce, il faut le pulvériser et le fondre à deux reprises aux moitié ou trois quarts de son poids d'oxyde d'antimoine.

(2) *Philosophical transactions*, t. 90 (1800).

voir calorifique est très-marqué; en se servant même de prismes en verre, le maximum d'action calorifique est placé à l'extrémité du rouge en dehors de la partie visible.

Seebeck (1), en répétant les expériences d'Herschell, examina l'influence de la nature du prisme sur la position du maximum de chaleur, et, en se servant de prismes solides en verre et de prismes à eau, il trouva que le maximum de chaleur pouvait se déplacer et venir jusque dans le jaune. Mais ces expériences ayant été faites à l'aide d'un faisceau de rayons solaires d'un certain diamètre, le spectre n'était pas épuré et contenait dans une même partie, par superposition, des rayons de réfrangibilité inégale.

Melloni, dont les recherches ont puissamment contribué à établir les lois du rayonnement de la chaleur et l'identité des rayonnements lumineux et calorifiques, chercha à vérifier le fait annoncé par Seebeck en opérant avec un faisceau de rayons solaires pénétrant par une fente rectiligne de peu d'épaisseur d'un volet de la chambre noire, fente qui était parallèle à l'arête des prismes. Ayant trouvé que le sel gemme était à peu près transparent pour la chaleur, il opéra avec différents prismes faits avec cette substance (2), et trouva une plus grande étendue de rayons calorifiques invisibles qu'Herschell ne l'avait observé; d'un autre côté, il observa que le maximum d'action était en dehors du rouge, à une distance de cette extrémité au moins égale à celle qui sépare le rouge du bleu vert. Il montra qu'en opérant avec des prismes de différente nature, le maximum d'action se déplaçait et se rapprochait du rouge d'autant plus que la matière des prismes agissait plus vivement, par absorption, sur les rayons invisibles moins réfrangibles que le rouge, et il reconnut que jamais ce maximum ne pénétrait dans le rouge et jusqu'au jaune.

On conçoit en effet que si tous les prismes sont incolores, c'est-à-dire s'ils sont transparents pour les rayons compris entre les réfrangibilités rouges et violettes, on doit toujours observer des effets calorifiques proportionnels dans les mêmes parties du spectre entre ces limites de réfrangibilité, et le spectre calorifique depuis le rouge jusqu'au violet doit conserver sa distribution calorifique comme il conserve sa distribution lumineuse; il n'y a donc qu'une différence dans la dispersion suivant la nature des prismes. Mais comme les sub-

(1) *Mémoires de l'Académie de Berlin*, 1819.

(2) *Journal de l'Institut*, tome Ier, page 212, n° 25. *Biblioth. univ. de Genève*, 2e série, t. 49 (1844).

tances qui composent les prismes agissent par absorption d'une manière très-inégale sur les rayons obscurs moins réfrangibles que le rouge, cette partie obscure du spectre a une étendue et une composition bien différentes, suivant les diverses substances, et comme on va l'indiquer plus loin. Ainsi le déplacement du maximum calorifique observé par Seebeck dans la partie visible du spectre, tenait à la superposition de plusieurs images prismatiques produites par un défaut de pureté de ces images.

Plusieurs physiciens depuis cette époque ont indiqué quelle est la répartition de la chaleur dans le spectre solaire; parmi les recherches qui ont été faites on peut citer celles de M. Franz (1), en se servant de prismes de flint glass et celles de M. Muller (2) en faisant usage de prismes de selgemme ainsi que de prismes de crown. Ces physiciens ont opéré à l'aide d'un spectre solaire ne présentant pas les raies noires, car l'effet thermique serait trop faible pour être appréciable dans les différents rayons; on forme alors un spectre par un faisceau de quelque épaisseur, et l'on indique la position approximative des raies d'après la place des couleurs.

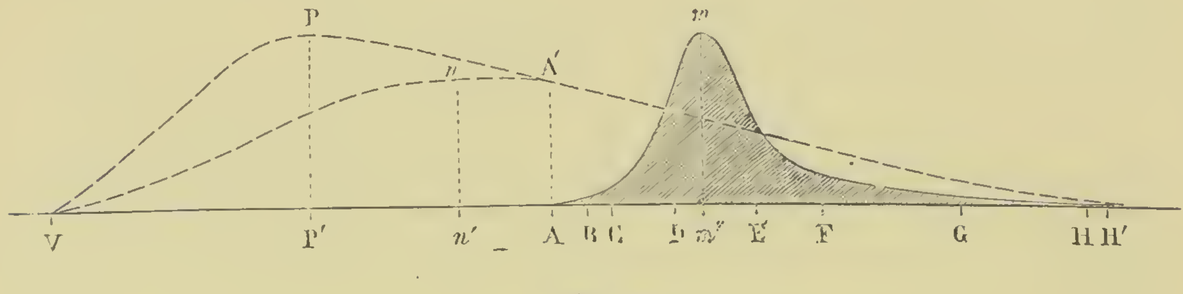


Fig. 42.

La fig. 42 représente la distribution de la chaleur et de la lumière dans le spectre solaire. Les lettres A, B... F. H, indiquent les place des raies noires de Fraünhoffer portant ces dénominations; en A est l'extrême rouge, en F le commencement du bleu, en HH'' l'extrémité du violet visible. La courbe A*m*H donne la distribution de l'intensité lumineuse d'après Fraünhoffer : au moyen d'un photomètre très-simple, il a indiqué dans son premier mémoire cité tome I[er], livre 4, page 130, la mesure des intensités des différentes parties du spectre, abstraction faite des couleurs, et ces intensités ont donné les valeurs des ordonnées

(1) *Ann. de Poggend.*, t. 101, p. 46 (1857). — *Ann. de chimie et de phys.*, 3[e] série, t. 51, p. 488.

(2) *Ann. de Poggend.*, t. 105. — Muller, *Traité de physique*, 1863, t. 2, p. 743.

qui ont servi à construire la courbe. Ces mesures ne sont que bien approximatives, et ne peuvent guère donner que des indications en plus ou en moins; on en verra les motifs quand nous parlerons des sensations produites sur la rétine. On reconnaît néanmoins, d'après ces évaluations, que le maximum de lumière se trouve en m dans le jaune vert à côté de la raie D du jaune.

La courbe V P H représente les effets calorifiques observés par M. Muller avec un prisme de sel gemme. Les ordonnées ont été prises comme proportionnelles aux déviations du galvanomètre indiquant l'intensité du courant thermo-électrique de l'appareil employé; elles ne sont donc pas proportionnelles aux effets thermométriques des rayons, mais elles indiquent le plus ou le moins d'effet produit par eux. On a supposé aussi que l'ordonnée maximum PP′ était égale à la longueur mm' qui représente l'effet lumineux maximum. On voit que l'étendue de la partie invisible du spectre AV est au moins égale à celle de la partie visible AB; en outre, le maximum d'action est situé en PP′, à une distance de A à peu près égale à celle de A F, comme Melloni l'avait déjà observé.

La courbe VnA′H′ représente l'effet observé avec un prisme de crown; on voit que jusque vers le rouge extrême, entre H et A, les deux courbes précédentes se confondent; mais à partir de A les ordonnées sont inférieures à celles de la courbe VP, ce qui montre que le verre agit par absorption sur une partie des rayons obscurs, et cela d'autant plus que les rayons sont moins réfrangibles. Le maximum d'action a lieu en n, plus près de A que n'était P.

Ces courbes n'ayant été tracées que par un petit nombre de points ne sont qu'approximatives; d'un autre côté, comme les spectres qui ont servi aux expériences étaient produits au moyen d'un faisceau d'une certaine épaisseur, les rayons différemment réfrangibles n'étaient pas parfaitement séparés. Des expériences faites avec des appareils plus sensibles pourraient donner des résultats plus précis; mais celles-ci montrent néanmoins comment l'absorption a lieu dans la partie la moins réfrangible du spectre.

M. Tyndall (1), en opérant avec l'arc voltaïque comme source de rayonnement et à l'aide d'un prisme de sel gemme, a donné une courbe

(1) Tyndall, *On radiation*, etc., lecture faite le 16 mai 1865 à Cambridge. *Philosophical transactions*, t. 156, p. 1 (novemb. 1865).

qui représente la distribution calorifique dans la partie visible et dans la partie moins réfrangible que le rouge prismatique. Cette dernière partie s'étend plus loin que dans les figures précédentes, ce qui montre que probablement l'atmosphère agit par absorption sur des rayons très-peu réfrangibles, qui ne peuvent être observés dans le spectre solaire mais qui sont appréciables dans le spectre des rayons de l'arc voltaïque. En évaluant l'action calorifique comprise entre les limites extrêmes de réfrangibilité des rayons visibles de l'arc voltaïque, c'est-à-dire entre les limites A et H, et en déterminant celle de tous les rayons invisibles moins réfrangibles que le rouge, il a estimé cette dernière comme étant neuf fois plus forte que la précédente. Ainsi les rayons obscurs entreraient en bien plus forte proportion dans le faisceau émané de l'arc voltaïque que les rayons de la partie lumineuse de l'image du spectre.

On a dit plus haut que dans les spectres formés par des faisceaux étroits et présentant toutes les raies, les effets calorifiques sur la pile thermo-électrique étaient à peine sensibles; cela explique pour quel motif on n'a pu observer des espaces correspondant aux raies noires, car là où se trouvent des raies obscures, les effets calorifiques doivent être nuls. On a vu, tome Ier, page 141, à propos du spectre infrarouge, quels étaient les moyens d'observation qui pourraient être employés et comment on avait pu dans quelques parties distinguer des espaces obscurs correspondant à des raies noires.

§ 2. *Action des écrans sur le rayonnement calorifique. Substances diathermanes. Écrans incolores et colorés, solides, liquides et gazeux.*

Les résultats qui viennent d'être exposés montrent que la chaleur rayonnante n'est pas plus simple ni plus homogène que la lumière, et l'on est conduit à admettre des rayons de chaleur de propriétés diverses, comme on admet des rayons lumineux différemment colorés. C'est la température plus ou moins élevée que possède une source calorifique qui donne à celle-ci la faculté d'émettre des rayons plus ou moins réfrangibles; mais on ne connaît pas la relation qui lie la réfrangibilité des rayons émis avec la température à laquelle leur émission commence.

Les corps qui se laissent traverser par la chaleur rayonnante sont nommés corps diathermanes, comme on nomme corps diaphanes ou transparents ceux qui transmettent librement les rayons lumineux; on appelle athermanes les corps qui arrêtent plus ou moins les rayons ca-

lorifiques, comme on appelle translucides ou opaques ceux qui absorbent la lumière en partie ou en totalité. Si l'on observe que les sources colorifiques à basse température émettent des rayons dont la réfrangibilité est inférieure à celles des rayons lumineux rouges, il s'ensuit que des substances peuvent absorber inégalement ces rayons ou être inégalement diathermanes, et laisser passer la même quantité relative des rayons compris entre les réfrangibilités A et H, c'est-à-dire être également transparentes pour la lumière. C'est ainsi que dans les expériences sur le spectre, dont il a été question dans le paragraphe précédent, le verre et l'eau, substances blanches et transparentes sous une faible épaisseur, arrêtent en partie les rayons moins réfrangibles que les rayons rouges, lesquels rayons traversent au contraire aisément le sel gemme qui est alors transparent pour la chaleur comme pour la lumière.

En général, les rayons calorifiques sont d'autant plus facilement absorbables qu'ils sont moins réfrangibles, c'est-à-dire qu'ils sont émis à de plus basses températures. Melloni (1) pour le démontrer a étudié les sources de chaleur les plus différentes et les plus constantes qu'il a pu trouver; ce sont 1° le rayonnement solaire ; 2° une lampe Locatelli, c'est-à-dire dont la mèche brûle sans être environnée d'une cheminée en verre; 3° une spirale de platine placée au-dessus de la mèche d'une lampe à alcool ; elle y devient incandescente et se maintient au rouge quand on éteint la lampe; 4° une lame de cuivre noirci, chauffée au-dessous du rouge dans la flamme d'une lampe à alcool et par conséquent environ à 400°; 5° un cube plein d'eau toujours maintenu à l'ébullition, c'est-à-dire une source calorifique à 100°.

Il a disposé la pile thermo-électrique de façon à recevoir un faisceau de rayons émanés de l'une de ces sources sur une des faces de la pile, et au moyen d'un galvanomètre donnant, à l'aide d'une table, l'intensité du courant produit, il a pu déterminer l'intensité calorifique de ce faisceau; en interposant alors sur la route des rayons un écran à faces parallèles formé par une substance diathermane, il a pu évaluer l'intensité du faisceau transmis au travers de cet écran et connaître l'absorption éprouvée par le faisceau. En opérant successivement sur les différentes sources et avec diverses matières solides incolores, il a obtenu des résultats parmi lesquels on peut citer les suivants :

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 53, p. 5. — Id., t. 55, p. 337. — Id. t. 72, p. 41.

NOMS DES SUBSTANCES.	INTENSITÉ DES RAYONS TRANSMIS.			
	LAMPE Locatelli.	PLATINE incandescent.	CUIVRE à 400°.	CUBE à 100°.
Sans écran	100	100	100	100
Sel gemme	92	92	92	92
Chaux fluatée blanche	78	69	42	33
Spath d'Islande	39	28	6	0
Verre de glace	39	24	6	0
Cristal de roche	38	28	6	0
Chaux sulfatée blanche	14	5	0	0
Alun	9	2	0	0
Glace (eau congelée)	6	0	0	0

Dans chaque série d'expériences on représente par 100 l'intensité des rayons incidents, c'est-à-dire que l'on rapporte les effets observés à celui qui est produit sans l'interposition d'un écran. On reconnaît que les rayons émis par le cube à 100° sont plus facilement absorbables que ceux des autres sources, car ils traversent seulement le sel gemme et la chaux fluatée, et sont absorbés en totalité par les autres écrans, tandis que les rayons émis par le cuivre à 400° traversent le spath d'Islande, le verre et le cristal de roche. Bien plus, le faisceau de rayons donné par le platine incandescent les traverse tous à l'exception de la glace, et celui qui est émis par la lampe Locatelli est transmis par tous les écrans avec une intensité encore plus grande. Ainsi, à mesure que la température de la source est plus élevée, les rayons traversent plus facilement les corps transparents et incolores.

On reconnaît en outre que, parmi ces corps, le sel gemme laisse passer la même proportion des divers faisceaux incidents, 92 pour 100 ; on doit en conclure qu'il est diathermane, c'est-à-dire transparent pour les divers rayons de ces sources calorifiques, et que la proportion de 8 p. 100, qui est la différence entre l'intensité des faisceaux incidents et transmis, indique la perte due aux réflexions à l'entrée et à la sortie de l'écran.

La transparence calorifique du sel gemme, permet d'utiliser ce corps pour former des prismes et des lentilles destinés aux recherches sur le rayonnement calorifique, cette substance solide étant celle qui possède au plus haut degré cette propriété; on avait pensé que tous les rayons,

quelle que fût la température de la source, traversaient cette matière sans éprouver d'autre absorption que celle qui résulte de la réflexion régulière ou irrégulière du faisceau incident sur les surfaces d'entrée et de sortie, mais MM. de la Provostaye et Desains (1) ont montré que les faisceaux des rayons calorifiques émanés de sources à température très-basse étaient partiellement arrêtés par le sel gemme. Dès lors cette substance peut agir comme les autres corps; elle éteint quelques-uns des rayons les moins réfrangibles, et dans l'étude du spectre calorifique obtenu avec un prisme fait avec cette matière, il doit y avoir des rayons obscurs encore moins réfrangibles que ceux qui ont été examinés et dont on n'a pu observer les effets. On ne connaît donc pas de corps tout à fait diathermane pour toute espèce de rayons, et si un tel corps existait, il ne s'échaufferait pas par rayonnement et ne pourrait varier de température qu'en s'échauffant ou se refroidissant par voie de conductibilité.

Quand une substance diathermane absorbe une partie des rayons incidents, si l'on ne tient pas compte de la perte qui résulte de la réflexion, cette absorption donne lieu à l'échauffement de la matière, qui peut alors agir à son tour comme source calorifique. On sait que les différentes recherches faites sur la chaleur rayonnante par Leslie, Rumfort, Dulong, de la Provostaye et Desains, etc..., ont montré l'égalité qui existe entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant d'un corps pour des rayons émanés d'une même source calorifique; il en résulte que les corps qui s'échauffent le plus deviennent à température égale les sources les plus actives. Ce principe étendu à la lumière, et ainsi qu'on l'a expliqué dans le tome Ier, page 162, a permis à M. Kirchhoff de rendre compte du phénomène des raies du spectre solaire; il ne sera pas donné plus de détails sur ce sujet, n'ayant parlé des effets produits par les écrans que pour montrer comment on pouvait distinguer dans le rayonnement calorifique les éléments différemment réfrangibles ou absorbables qui le constituent.

Si au lieu de se servir d'écrans incolores on emploie des écrans colorés, comme dans les recherches de MM. Melloni, Masson et Jamin (2), Franz (3), indépendamment de l'action que les écrans

(1) *Comptes rendus de l'Académ. des sciences*, t. 36, p. 84.
(2) *Comptes rendus de l'Académ. des sciences*, t. 31, p. 14.
(3) *Ann. de Poggend.*, t. 94, p. 337, et t. 101, p. 46. — *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 46, p. 111, et t. 51, p. 488.

exercent sur les rayons infra-rouges, ainsi que les précédents ils agissent en même temps par absorption sur des rayons dont la réfrangibilité est comprise entre les limites du spectre solaire A et H. En isolant alors chaque partie d'une réfrangibilité bien déterminée d'un spectre, et en étudiant l'effet de ces écrans sur la lumière et sur ceux qui agissent sur les thermoscopes, on trouve toujours que dans les parties correspondantes l'extinction et la transmission de la lumière suivent les mêmes lois que l'extinction et la transmission de la chaleur, conséquence nécessaire de l'identité de ces deux agents.

Quant aux rayons compris dans la partie infra-rouge, ils sont absorbés plus ou moins, selon la nature des corps, comme lorsqu'on a fait usage des écrans incolores; M. Franz a reconnu qu'en général les liquides colorés en bleu absorbent ces rayons calorifiques invisibles, tandis que ceux colorés en rouge les laissaient passer; le chromate de potasse, par exemple, est diathermane pour ces rayons.

Melloni avait trouvé, dès ses premières recherches, que la teinte plus ou moins foncée de certains corps n'apporte aucune modification dans la manière dont les rayons obscurs sont transmis; ainsi le quartz enfumé a la même diathermanéité que le quartz limpide; de plus, le noir de fumée en couche mince, placé sur une plaque de sel gemme ou d'un autre corps (1), laisse également bien traverser ces rayons et ne porte obstacle qu'à la transmission des rayons plus réfrangibles qui sont compris entre les réfrangibilités A et H du spectre solaire. Ce fait est remarquable, et montre que le carbone n'a qu'un faible pouvoir de diffusion. On a déjà parlé de ces effets dans les préliminaires de ce volume, page 11.

Les liquides incolores ou colorés se comportent comme les corps solides; les uns sont très-diathermanes comme le sulfure de carbone, d'autres comme l'eau sont au contraire très-absorbants. M. Desains (2) a constaté que le chlorure de carbone liquide, à égalité d'épaisseur, est plus facilement traversé par la chaleur obscure que le sulfure de carbone lui-même. Le chloroforme présente une diathermanéité assez grande, mais moindre. La benzine et la glycérine au contraire sont des liquides très-absorbants. Si l'on rapproche ces résultats du pouvoir absorbant que l'eau exerce, on pourrait peut-être en conclure qu'en général l'hydrogène apporte un pouvoir absorbant assez grand dans les combinaisons dont il fait partie.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 1839, t. 9, p. 315.
(2) Id., t. 65, p. 407.

Le brome, qui sous une petite épaisseur est pour ainsi dire opaque, se laisse traverser par les rayons calorifiques infra-rouges comme le quartz enfumé. Une dissolution concentrée d'iode dans le sulfure de carbone offre un autre exemple de ce genre d'action; ce liquide, d'un rouge très-foncé sous une faible épaisseur, et dont une couche plus épaisse ne laisse traverser aucun rayon lumineux, laisse cependant passer presque en totalité la partie infra-rouge du spectre. On verra le parti que M. Tyndall a pu en tirer pour des expériences dont les résultats seront cités plus loin.

Le gaz et les vapeurs agissent par absorption sur le rayonnement calorifique comme les solides et les liquides; mais la quantité de matière qui se trouve sur la route des rayons étant plus petite, il faut des dispositions particulières pour étudier les effets produits. MM. Tyndall et Magnus se sont particulièrement occupés de ces questions (1).

M. Tyndall, dans plusieurs séries d'expériences, a fait usage d'une source calorifique obscure (cuivre chauffé au-dessous du rouge à 400° environ) et de la disposition suivante : un tube horizontal, terminé par deux faces en sel gemme, est placé devant une des faces d'une pile thermo-électrique, de façon à ce que les rayons émanés de la source passent par le tube avant de frapper la face de la pile; une autre source calorifique semblable, servant de source de comparaison, agit sur l'autre face de la pile, de sorte que si les deux sources sont égales, l'aiguille du galvanomètre reste à 0. Si l'un ou l'autre flux calorifique l'emporte, aussitôt l'aiguille est déviée en raison de la différence de température, et l'on peut conclure des intensités du courant électrique déduites de ces déviations les intensités relatives des deux faisceaux calorifiques. On raréfie l'air dans le tube, puis on y introduit successivement différents gaz, mais sous une pression de 2 centim. 5 de mercure, c'est-à-dire ayant $\frac{1}{30}$ de la force élastique de l'air extérieur. Les nombres suivants expriment les quantités relatives de chaleur absorbée par les gaz sous cette faible pression, en prenant pour unité celle absorbée par l'air atmosphérique à la pression ambiante :

Noms des gaz.	Absorption relative.
Air.	1
Oxygène.	1

(1) Tyndall, *Philosoph. transact.*, 1861 et 1862. — *Sur la radiation*, 1865. — Magnus *Ann. de Poggend.*, t. 114. — *Mémoires de l'Acad. de Berlin*, 1862. — *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 63, 64, 66 et 67; 4e série, t. 3.

Noms des gaz.	Absorption relative.
Azote	1
Hydrogène	1
Oxyde de carbone	750
Acide carbonique	972
Acide chlorhydrique	1005
Protoxyde d'azote	1590
Acide nitreux	1860
Hydrogène sulfuré	2100
Ammoniaque	5460
Gaz oléfiant	6030
Acide sulfureux	6480

Chacun de ces gaz est transparent pour la lumière, c'est-à-dire que les rayons compris dans les limites du spectre visible les traversent également bien; mais pour les rayons de plus grande longueur d'onde émanés de la source obscure il y a de grandes différences dans les pouvoirs absorbants. Ces différences montrent que les gaz simples se comportent à peu près de même et absorbent peu la chaleur rayonnante; mais les gaz composés ont un pouvoir absorbant considérable, et il semble qu'il soit d'autant plus grand que les gaz sont près de leur changement d'état.

Les vapeurs se comportent de même; en prenant pour unité l'absorption de l'air à la pression ambiante, on a pour les vapeurs placées dans le tube indiqué précédemment, sous la pression de $\frac{1}{60}$ d'atmosphère :

Noms des vapeurs.	Absorption relative.
Sulfure de carbone	47
Benzine	136
Éther sulfurique	440
Éther formique	548
Éther acétique	612

Chacune de ces vapeurs dégagées dans l'air, devant un corps qui émet des rayons obscurs, intercepte plus ou moins le flux calorifique.

Les parfums répandus dans l'air produisent un effet analogue, bien qu'ils ne s'y trouvent qu'en très-faible quantité. On a cité dans le tableau suivant les résultats observés par M. Tyndall en plaçant dans un cou-

rant d'air passant dans le tube qui forme écran un papier buvard humecté d'une huile essentielle :

Substances odorantes.	Absorption.
Essence de rose	34
Essence de lavande	60
Fleurs de camomille	87
Huile de cassia	100
Essence d'anis	372

Ainsi de très-faibles quantités de vapeur contenues dans l'air lui donnent un grand pouvoir d'absorption pour les rayons moins réfrangibles que le rouge prismatique. D'après M. Tyndall, la vapeur d'eau elle-même a un énorme pouvoir absorbant, et l'effet produit par l'atmosphère sur la chaleur solaire doit être rapporté presque en totalité à la vapeur aqueuse, tant son action surpasse celle de l'air sec. En effet, suivant son évaluation, la vapeur d'eau dans les conditions hygrométriques ordinaires a un pouvoir absorbant 200 fois plus grand que celui de l'air dans lequel il est diffusé, ce qui donne pour l'action de la vapeur d'eau comparée à poids égal une valeur plusieurs milliers de fois supérieure à celle de l'air sec.

M. Magnus (1), tout en ayant trouvé pour les pouvoirs absorbants des différents gaz des valeurs qui s'accordent avec les valeurs indiquées plus haut (autant qu'on peut l'espérer, les méthodes d'expérimentation n'étant pas les mêmes), a cependant obtenu pour la vapeur d'eau des résultats différents ; car, d'après ses expériences, l'air humide contenant de la vapeur d'eau transparente ne diffère pas beaucoup de l'air sec, tandis que quand cet air contient de la vapeur vésiculaire, il absorbe facilement la chaleur. Les résultats différents obtenus par M. Tyndall ne proviendraient, suivant lui, que de la condensation de la vapeur d'eau par les parois des appareils ainsi que de l'action exercée par l'eau ainsi condensée sur les rayons calorifiques et sur la pile. Il faut remarquer, cependant, que si l'action exercée par les vapeurs est proportionnelle à celle qu'exercent les mêmes corps à l'état liquide, comme on va le voir ci-après, alors l'eau et la vapeur vésiculaire étant assez fortement absorbantes, la vapeur aqueuse transparente doit l'être également.

(1) *Ann. de Pogg.*, t. 118, p. 575. *Ann. de chimie et de phys.*, 3e série, t. 65, 66 et 67. *Archives des sciences physiques et naturelles*, Genève, nouvelle période, t. 18, p. 50, et 83, t. 20, p. 152, et t. 27, p. 88.

M. Tyndall a trouvé en effet que l'absorption opérée par plusieurs vapeurs est proportionnelle à celle que donnent les mêmes substances à l'état liquide; il a établi ce résultat en montrant que l'ordre d'absorption est le même dans les deux cas, soit que l'on emploie une série de liquides contenus dans des auges, soit les mêmes corps à l'état de vapeur dans le tube dont il a été question plus haut.

M. P. Desains (1) a déterminé directement les pouvoirs absorbants que l'éther ordinaire et l'éther formique à l'état liquide et à l'état de vapeur exercent sur le flux calorifique provenant d'une source obscure à 400° ou bien émané d'une lampe à cheminée en verre, et il a trouvé exactement les mêmes nombres; au lieu d'employer des tubes et des auges formées par des plaques en sel gemme, il a fait usage de lames de spath fluor très-limpide, qui, bien que moins diathermanes que le sel gemme, comme on l'a vu plus haut dans le tableau de la page 30, sont néanmoins très-perméables au rayonnement calorifique (2). Au moyen de ces dispositions, il a pu constater que l'éther, à l'état liquide ou à l'état de vapeur, exerce la même action absorbante sur les rayons calorifiques, pourvu que le nombre des molécules actives que les rayons rencontrent soit le même. En opérant sur le gaz d'éclairage, il a constaté également que dans un tube déterminé un poids constant de ce gaz exerce une action complétement indépendante de la quantité plus ou moins grande d'air qu'on y mêle; on sait que dans ces circonstances le pouvoir absorbant de l'air est si faible qu'on peut le négliger.

On a vu plus haut que l'acide carbonique avait un pouvoir absorbant plus grand pour les rayons obscurs que celui des gaz simples, mais bien moindre que celui des autres gaz composés et plus de six fois moindre que le gaz oléfiant et l'acide sulfureux. M. Tyndall a reconnu que si l'on se sert, comme source calorifique, de la flamme de l'oxyde de carbone dans laquelle l'acide carbonique formé par la combustion est l'agent principal du rayonnement, alors l'acide carbonique est beaucoup plus absorbant pour cette source que les autres gaz et au moins deux fois autant que le gaz oléfiant. Cet effet est analogue à celui que l'on observe dans l'émission de la lumière, et résulte du principe de l'égalité entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant d'un même corps à égalité de température, car dans cette flamme, l'acide carbonique, étant le corps qui rayonne, donne des rayons qui sont absor-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 64, p. 1086.
(2) Id., t. 65, p. 407.

bés en plus grande abondance par ce corps que par d'autres substances. M. Tyndall a même proposé l'emploi de la flamme de l'oxyde de carbone pour révéler la présence dans l'atmosphère de traces d'acide carbonique. Le rayonnement calorifique de la flamme de l'hydrogène, par la même raison, est presque entièrement arrêté au moyen d'une couche d'eau de quelques millimètres d'épaisseur (1).

§ 3. *Incandescence produite par les rayons calorifiques obscurs.*

L'emploi de la solution d'iode dans le sulfure de carbone, dont on a parlé plus haut page 33, qui lorsqu'elle contient suffisamment d'iode est sensiblement opaque pour la lumière, mais reste perméable aux rayons infra-rouges, a permis à M. Tyndall (2) de concentrer ces rayons obscurs sur une étendue déterminée et d'élever au-dessus du rouge la température des corps qui se trouvent soumis à leur influence. Pour faire cette expérience, il s'est servi, comme source calorifique, d'un arc voltaïque donné par un régulateur photo-électrique; les rayons concentrés par le miroir concave fixé au fond du régulateur traversaient un écran plan terminé par deux plaques minces de verre et contenant la dissolution d'iode, et après ce passage le faisceau convergent ne produisait plus de lumière au foyer, mais était capable d'enflammer en ce point le papier, le charbon et les corps combustibles. Mais ce qui montre que les rayons pouvaient élever la température au-dessus du rouge sans le secours d'aucune action chimique, c'est qu'en tombant sur une lame de platine platinisée, dans le vide ou dans l'air, ils ont élevé celle-ci à l'incandescence et l'ont rendue capable d'émettre des rayons lumineux, c'est-à-dire des rayons d'une réfrangibilité plus grande que celle des rayons incidents (3).

(1) *Ann. de physique et de chimie*, 4e série, t. 3, p. 506.

(2) Tyndall, *Sur la radiation*, 1865. — *Philosoph. transact.*, t. 156, p. 1 (1866) (mém. du 23 nov. 1865).

(3) Je dois faire remarquer qu'il est à ma connaissance que ce sujet, avant 1865, avait déjà attiré l'attention des savants. En effet, lors du concours pour le prix Bordin à décerner en 1864 par l'Académie des sciences de l'Institut de France, et dont j'étais un des juges, un mémoire inscrit sous le n° 1, et portant pour épigraphe « *fiat lux* », avait été déposé au secrétariat le 20 juin 1864. L'auteur proposait de construire de grands miroirs et d'examiner l'effet de la chaleur rayonnante pour observer si l'on ne changerait pas la longueur d'onde des rayons émis par les corps placés au foyer. Le prix ne fut pas décerné et le concours fut prorogé à l'année suivante. (Jugement du concours, décembre 1864; résumé, *Comptes rendus*, tom. 60, p. 289, fév. 1865.)

Ce mémoire, auquel une addition fut faite avant le 29 août 1864, fit partie du concours

Quand on place ainsi le platine au foyer du miroir, on ne tarde pas à distinguer les images des deux charbons, points où l'élévation de température est la plus forte, de sorte que les deux extrémités polaires de ces charbons ont, pour ainsi dire, leur image thermographique qui n'apparaît qu'au moment où le platine est porté à l'incandescence. En opérant de cette manière, l'écran plan de sulfure de carbone iodé absorbant les rayons compris entre les réfrangibilités correspondant aux raies A et H du spectre solaire s'échauffe assez vivement, et l'inflammation du sulfure arrive fréquemment. Pour obvier à cet inconvénient, on fait généralement l'expérience de la manière suivante, comme le représente la figure 43 :

Le régulateur de lumière électrique est en R, et les charbons polaires peuvent être placés au centre de l'appareil. Le miroir en verre argenté M est mobile au moyen de la tige P, de sorte qu'on peut l'avancer ou l'éloigner et faire converger les rayons émanés de l'arc plus ou moins loin en avant de l'appareil. Au lieu d'un écran plan de sulfure de carbone iodé, on met simplement un ballon B rempli de cette dissolution, lequel étant placé à l'orifice de la lanterne fait fonction de lentille et d'écran, et fait converger vers *a* les rayons qui tombent sur sa surface antérieure. En *a* on met les corps combustibles qui doivent recevoir l'action du foyer calorifique.

On peut demander au foyer invisible situé en avant du ballon B ce que l'on obtient d'un foyer ordinaire; le bois, le papier, le fulmi-coton s'enflamment. Mais l'épaisseur du verre du ballon déforme un peu les images, de sorte que l'expérience faite avec le platine platinisé peut ne pas réussir, ce qui n'a pas lieu en opérant avec un écran plan.

de l'année suivante, et voici ce qui est dit dans le rapport de M. Fizeau (*Comptes rendus*, t. 62, p. 186). « Ce travail renferme des considérations étendues et intéressantes sur les « tranformations que les diverses radiations paraissent éprouver dans les phénomènes de « fluorescence, de phosphorescence et d'échauffement par la chaleur rayonnante; phéno- « mènes dans lesquels les nouvelles radiations possèdent en général une réfrangibilité plus « faible que celle des radiations primitives qui leur ont donné naissance.

« L'auteur s'est posé la question de savoir s'il serait possible de réaliser la transforma- « tion inverse, c'est-à-dire celle des radiations moins réfrangibles en radiations plus réfran- « gibles, et il propose plusieurs dispositions expérimentales destinées à résoudre cette « question. Malheureusement le mémoire ne renferme pas de conclusions définitives, et « l'on doit regretter, avec l'auteur, que des circonstances particulieres ne lui aient pas « permis de pousser plus loin les recherches. »

L'auteur, M. Akin, qui a publié depuis son mémoire, n'avait fait à cette époque aucune expérience.

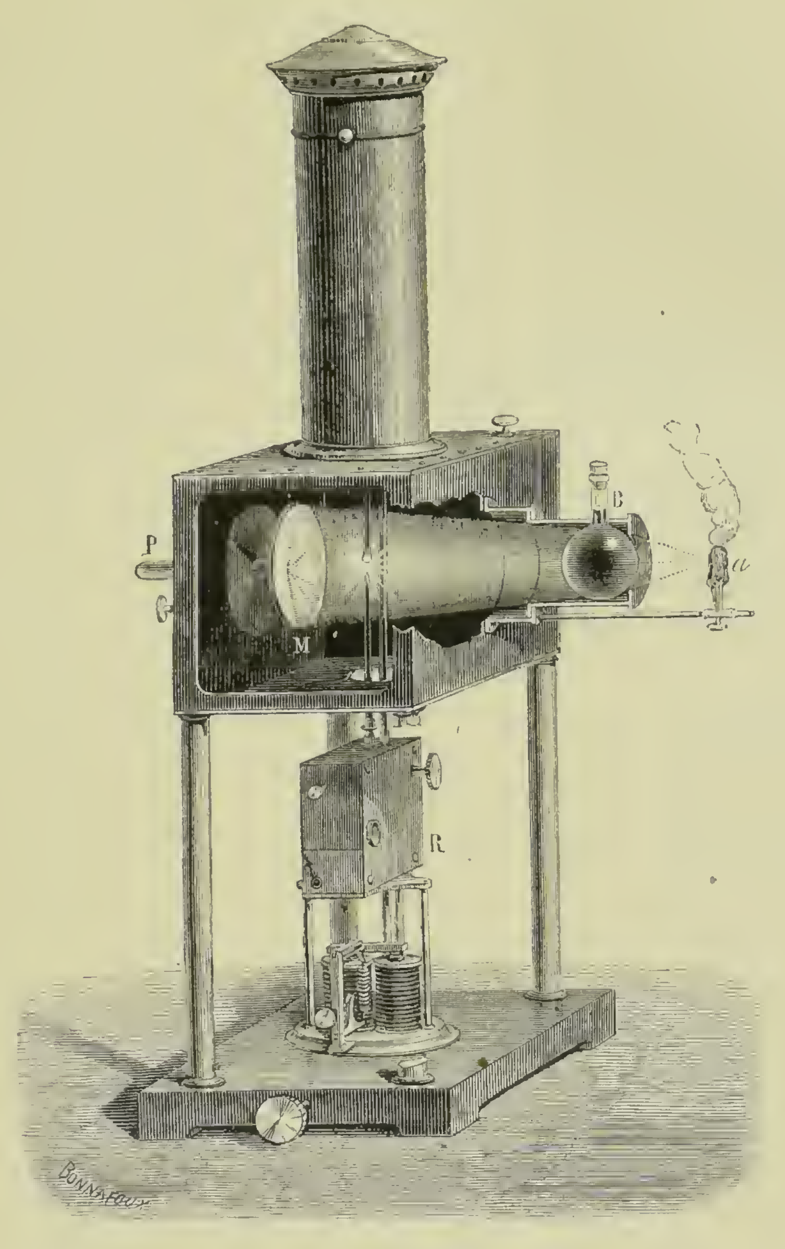


Fig. 43.

M. Tyndall a répété les mêmes expériences avec un verre noir dont la couleur est donnée par le carbone, car on a vu que ce dernier corps est diathermane pour les rayons infra-rouges ; mais il faut des verres noirs qui en couches minces sont rouges, et non pas ceux qui sont alors verts, car ces derniers arrêtent les rayons calorifiques obscurs. Néanmoins, les expériences réussissent mieux avec les écrans plans de sulfure de carbone contenant l'iode en dissolution.

Ces expériences permettent de reconnaître que les rayons infra-rouges, même lorsqu'ils sont concentrés, ne donnent aucune impression

lumineuse sur la rétine; en opérant ainsi on doit se mettre à l'abri de l'échauffement des parties de l'œil qui entourent la rétine. Nous verrons du reste, en parlant des effets physiologiques, que ces rayons sont en partie absorbés par les milieux qui composent l'organe de la vision, et qu'en deçà de la longueur d'onde correspondante au rouge extrême, les rayons émanés des sources lumineuses n'exercent plus d'effet sur nos yeux.

M. Tyndall a donné le nom de phénomènes de calorescence à ces phénomènes qui mettent en évidence un changement de réfrangibilité entre les rayons reçus par les corps et les rayons émis, c'est-à-dire qui indiquent une émission de vibrations rapides succédant à une absorption de vibrations plus lentes.

En admettant, comme on le fait habituellement, que les pouvoirs émissifs et absorbants d'un corps sont égaux pour des rayons d'une même température, on est conduit à cette conclusion, qu'une source calorifique maintenue à une température déterminée ne peut produire sur ce corps une élévation de température supérieure à celle-ci, même en concentrant sur lui la chaleur émise par la source. Ainsi, avec des rayons émis par une source à 100°, on ne pourrait pas dépasser cette limite de température. Mais si les pouvoirs émissifs et absorbants ne sont pas égaux, ce qui peut dépendre de l'état et de la nature du corps qui reçoit l'action calorifique ainsi que de l'intensité des rayons incidents, alors des rayons calorifiques dont l'intensité serait suffisante pourraient donner une élévation de température supérieure à celle de la source qui les émet; dans ce cas, avec une très-grande quantité de rayons provenant d'une source à 100°, mais répartis sur une petite étendue, on devrait dépasser cette limite de température.

Pour concevoir la possibilité de ce résultat, il faut remarquer, comme on l'a déjà vu page 21, que si la température d'une source calorifique augmente, non-seulement des rayons de plus en plus réfrangibles viennent s'ajouter à ceux qui sont émis à plus basse température, mais encore ces premiers rayons de faible réfrangibilité augmentent graduellement d'intensité. Or, d'après ce qui a été dit tome Ier, page 70 et suivantes, puisque l'intensité de chaque groupe de ces rayons croît d'une manière extrêmement rapide avec la température de la source, il peut se faire qu'à la température si élevée de l'arc voltaïque les rayons infra-rouges aient une telle intensité qu'ils puissent donner lieu au phénomène dont il est question ici; tandis qu'avec

des sources ayant relativement des basses températures, c'est-à-dire à 100 ou 200°, il est possible que l'intensité des rayons émis soit trop faible pour que, même concentrés, on puisse dépasser d'une manière sensible la température de la source. Ce serait dans ces conditions que la transformation des vibrations pourrait avoir lieu, et non pas par un changement immédiat dans la vitesse des mouvements vibratoires; en d'autres termes, les corps recevraient une impression de la part du rayonnement calorifique et émettraient ensuite des rayons d'une autre longueur d'onde que ceux qui auraient agi sur eux, contrairement aux effets que présentent les phénomènes de phosphorescence étudiés dans la première partie (voir t. 1, pages 302 et 320), puisque les corps phosphorescents émettent en général des rayons moins réfrangibles que les rayons qui les excitent. On comprend tout l'intérêt que présente ce sujet d'étude, que les recherches ultérieures sur la chaleur rayonnante ne peut manquer d'élucider.

§ 4. *Quantité de chaleur émanée du soleil. Action exercée par l'atmosphère terrestre.*

L'atmosphère joue un rôle important dans la répartition de la chaleur rayonnante sur le globe; cette enveloppe transparente absorbe une partie des rayons émanés du soleil, et tempère l'action de la chaleur par cette absorption, car elle empêche que la portion de la terre privée momentanément de la présence du soleil pendant la nuit, ne soit exposée à un froid considérable par suite du rayonnement de la terre dans l'espace.

D'après ce qui a été dit plus haut, la vapeur d'eau est en grande partie cause de l'absorption de la chaleur lors de la transmission des rayons solaires au travers de l'atmosphère; car, malgré sa faible proportion dans les masses atmosphériques, M. Tyndall admet qu'elle a un pouvoir absorbant au moins deux cents fois plus fort que celui de l'air dans lequel elle est diffusée.

On a cherché, pour remonter à la quantité de chaleur émanée du soleil, quelle était la partie du rayonnement ainsi absorbée par l'atmosphère. Plusieurs physiciens se sont occupés de ce sujet, notamment MM. de Saussure, J. Herschell, Pouillet, Forbes et Quetelet; ils ont fait usage d'actinomètres de dispositions diverses. M. Pouillet (1) a employé

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 7, p. 24, 1838. Becquerel et Ed. Becquerel, *Physique terrestre et météorologie*, p. 48.

les appareils qu'il a nommés pyrhéliomètres, et qui sont formés de vases en argent à minces parois, noircis, remplis d'eau, orientés de façon à recevoir les rayons du soleil, et qui, fonctionnant comme calorimètres, donnent par le changement de température de l'eau la quantité de chaleur reçue par l'appareil pendant un temps déterminé.

En évaluant les élévations de température aux diverses heures de la journée, lorsque les rayons solaires ont agi pendant le même temps, pendant cinq minutes, par exemple, on trouve des nombres forts différents pour les quantités de chaleur absorbées, en raison de l'épaisseur inégale de l'atmosphère traversée par les rayons. Bouguer (1) a admis que l'intensité des rayons qui traversent différentes couches d'air peut être représentée par les ordonnées d'une courbe logarithmique dont les abscisses indiquent les épaisseurs de ces couches. L'on a d'après cette hypothèse :

$$t = A\, p^e,$$

t désignant la température, e l'épaisseur de la couche atmosphérique calculée d'après une formule approximative assez simple, A et p deux constantes.

La première constante A est indépendante de l'état de l'atmosphère ; la seconde p, varie le même jour et d'un jour à l'autre suivant la sérénité de l'air. A est donc la constante solaire contenant, comme élément, la puissance calorifique du soleil, et p la constante atmosphérique renfermant le pouvoir de transmission variable dont est douée l'atmosphère.

M. Pouillet, à Paris, d'après cette loi, a trouvé pour p une valeur variable entre 0,72 et 0,79. M. Quetelet (2) a obtenu à Bruxelles le nombre 0,62, et M. Forbes (3), en Suisse, est arrivé au nombre 0,685. Voici du reste quelques-unes des valeurs de p données par différents observateurs :

Bouguer.	0,812
Lambert.	0,589
Leslie.	0,750

(1) Bouguer, *Traité d'optique sur la gradation de la lumière;* Paris, 1729, section 3, p. 63.

(2) Du rayonnement solaire. *Annuaire météorologique de la France* pour 1850, p. 143.

(3) *Philosoph. transact.*, t. 132, 1842.

Pouillet.	de 0,72 à	0,790
Forbes.		0,685
Quetelet.		0,620

En représentant par 1 l'intensité d'un rayon émané du soleil et tombant sur l'atmosphère, dont l'épaisseur reste la même et est égale à 1, alors la quantité absorbée par celle-ci est $1-p$. Il résulte des nombres précédents que dans le trajet vertical des rayons venant du zénith, l'atmosphère absorbe entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{4}$ de la chaleur incidente; d'après M. Quetelet, dans nos climats c'est le nombre $\frac{1}{3}$ qui doit être adopté.

On a supposé, dans le raisonnement précédent, que les rayons incidents éprouvaient les mêmes actions de la part de l'atmosphère et diminuaient d'intensité suivant la même loi; mais, ainsi qu'on l'a vu dans les paragraphes antérieurs, les éléments différemment réfrangibles dont ils se composent sont différemment absorbables, et dès lors, tout en supposant qu'ils subissent la même loi d'absorption, ce qui n'est pas prouvé, les coefficients ne doivent pas être les mêmes pour chacun d'eux. Indépendemment de cela, il est probable que les rayons de diverses réfrangibilités ne sont pas absorbés de la même manière, et qu'il se produit un phénomène analogue à celui qui donne lieu aux raies ou bandes du spectre solaire; tel est peut-être le motif des différences observées dans divers lieux, selon l'état de l'atmosphère.

Si l'on cherche à se faire une idée de la quantité totale de chaleur reçue par la terre et de la portion absorbée par l'atmosphère, on trouve, d'après les recherches de M. Pouillet, que la quantité totale de chaleur que le soleil envoie par minute, sur chaque centimètre carré de la surface de la terre est représentée par

1,7633 calories,

si l'air atmophérique n'absorbait aucun des rayons incidents; mais en raison de cette absorption, à chaque instant sur l'hémisphère éclairé par le soleil, la partie de la chaleur qui arrive au sol est comprise entre 0,5 et 0,6 de la quantité de chaleur incidente, et celle qui est absorbée est comprise entre 0,5 et 0,4. La terre ne reçoit donc environ, par suite de la présence de l'atmosphère, que la moitié à peu près de la chaleur émanée du soleil.

Si l'on évalue cette quantité de chaleur en glace fondue, on trouve que sans la présence de l'atmosphère la quantité de chaleur que

nous envoie le soleil en un an serait capable de fondre une couche de glace de 30 mètres répandue sur toute la surface du globe; mais comme en réalité, par suite de la présence de l'atmosphère, il n'y a environ que la moitié de cette chaleur reçue sur le globe, alors cette quantité de chaleur qui nous arrive annuellement est capable seulement de fondre une couche de glace de 15 mètres d'épaisseur répartie uniformément sur la terre.

Ces mêmes résultats donnent une évaluation approchée de la quantité de chaleur émanée à chaque instant du soleil : si l'on transforme encore en glace fondue la quantité de chaleur qui est lancée de toutes parts dans l'espace par le soleil, on trouve que par minute elle fondrait une couche de glace qui envelopperait cet astre et qui aurait un peu plus de 11 mètres d'épaisseur, ou bien encore que cette quantité de chaleur fondrait en un jour une couche de 17 kilomètres répartie sur le soleil. D'après les motifs indiqués précédemment, ces résultats ne peuvent être considérés que comme approximatifs.

LIVRE II.

EFFETS CHIMIQUES.

CHAPITRE PREMIER.

Effets divers, phénomènes généraux.

§ 1er. *Préliminaires; action de la lumière sur les vapeurs, le phosphore, le chlore; coloration des verres.*

Les rayons lumineux jouissent de la propriété de provoquer des réactions chimiques nombreuses entre certains corps, ou d'opérer la décomposition d'un grand nombre de substances; ces effets sont rendus manifestes par les changements de couleur d'un grand nombre de ces composés et entre autres des combinaisons d'argent. Il ne semble pas que des observations de ce genre, un peu certaines, soient fort anciennes, car les auteurs du seizième et du dix-septième siècle, comme Fabricius, Gesner, Lemery, n'en citent aucun exemple. Les faits précis ne datent que du moment ou Schéele (1), comme on l'a vu dans le 1er volume, page 31, reconnut que le chlorure d'argent noircit de préférence dans les rayons violets du spectre solaire, et où Ritter en prouvant que cette action s'étend au delà du violet, dans la partie invisible de l'image prismatique, montra que le phénomène de coloration n'est pas dû à une action calorifique, mais à une action particulière exercée sur le corps par le rayonnement lumineux. Depuis cette époque les recherches se sont multipliées; elles ont surtout pris un grand déve-

(1) Schéele, *Traité de l'air et du feu*, 1777, § 66, trad. franç. 1781, p. 145. En note, dans l'ouvrage, il est dit que l'observation de Schéele est commune à lui et à Beccari, Meyer, Schultze et Senebier.

loppement après la découverte de la fixation des images de la chambre noire par Daguerre, et ont puissamment contribué aux perfectionnements apportés à cette magnifique invention.

Si les effets calorifiques peuvent être produits indifféremment sur les corps par un même groupe de rayons solaires, et ne paraissent dépendre que du pouvoir absorbant de ces corps, il n'en est pas de même des effets chimiques, qui tiennent essentiellement à la nature des substances exposées au rayonnement lumineux, et qui pour chaque substance exigent des rayons d'une longueur d'onde comprise entre certaines limites déterminées. Il y a donc dans ces réactions chimiques un genre tout particulier d'effets produits par la lumière.

Il faut d'abord examiner si la lumière peut modifier l'état physique ou l'arrangement moléculaire des corps, sans qu'il y ait action chimique entre des éléments en présence. Bien qu'on ait observé plusieurs séries de faits dont il va être question, et que les phénomènes de phosphorescence étudiés dans la première partie de cet ouvrage aient montré que les vibrations lumineuses peuvent se transmettre aux particules des corps et y exciter des vibrations persistantes pendant quelques instants, cependant on va voir que jusqu'ici c'est seulement dans une circonstance particulière où le résultat paraît dû à un changement isomérique ; dans les autres, les phénomènes observés peuvent tenir le plus souvent à des effets calorifiques ou à des changements chimiques qu'on n'avait pas pu reconnaître de prime abord.

Quelques expériences de Petit, faites en 1722, avaient montré que des dissolutions de salpêtre et de sel ammoniac exposées au soleil donnaient en s'évaporant des cristallisations plus belles qu'à l'ombre. Chaptal montra plus tard (1) que des rayons lumineux isolés et tombant sur des capsules décidaient la cristallisation sur les parties des verres où ils étaient dirigés. Dorthez (2) fit des expériences analogues avec des flacons tenant du camphre en dissolution ; il vit que ces flacons présentaient des cristallisations du côté où ils étaient exposés à la lumière. Il n'est pas impossible que l'action exercée par la lumière sur les vapeurs augmente leur diffusion dans l'air ambiant; mais il reste à savoir si les variations de température dues au rayonnement calorifique ne pourraient pas expliquer simplement les différences observées.

Il en est peut-être de même des changements de forme cristalline de

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences de Toulouse*, t. 3.
(2) *Ann. de chimie*, t. 2, p. 91.

plusieurs substances, comme l'a observé Mitscherlich (1); ainsi, les cristaux de sulfate de nickel, de séléniate de zinc, etc., qui appartiennent au système prismatique, lorsqu'on les expose en été à la lumière solaire, se changent en octaèdres à base carrée; comme le changement peut aussi se produire par l'action de la chaleur entre 20 et 30°, il n'est donc pas nécessaire d'admettre une action spéciale de la part de la lumière pour expliquer l'effet produit.

Le phosphore éprouve à la lumière des changements de couleur qui paraissent avoir été observés d'abord par Bœckmann (2). Ce chimiste a reconnu que lors de l'exposition du phosphore à la lumière solaire dans de l'azote et d'autres gaz, il se dépose sur les parois des vases une poudre qui n'a pas la même couleur dans les différents milieux, tandis qu'à l'ombre il ne se passe rien de semblable. Vogel (3), qui a repris ces expériences, a montré que le phosphore se colore également dans le vide barométrique, et se recouvre alors d'un enduit rougeâtre; il se dépose même dans ce dernier cas des paillettes rouges brillantes sur les parois du tube. Cet effet se produit rapidement dans les rayons violets du spectre et très-lentement dans les rayons rouges; Vogel a conclu de ses recherches que le composé rouge qui se forme dans les différents gaz exposés au soleil, ou qui reste après une combustion rapide, est un oxyde rouge de phosphore. Mais si, d'après les recherches de M. Schrœtter (4), le composé rouge obtenu dans la combustion du phosphore est du phosphore rouge ou amorphe, la lumière produirait donc sur le phosphore la même transformation moléculaire que la chaleur peut effectuer.

En 1844, M. Draper (5) annonça que le chlore exposé préalablement à la lumière solaire acquiert une activité plus grande pour se combiner avec l'hydrogène sous l'influence de la lumière diffuse, que s'il est resté à l'obscurité avant d'être mélangé à l'hydrogène. Pour observer ce phénomène, il disposa deux cloches pleines de chlore sur un bain d'eau salée (liquide qui dissout peu de chlore); puis l'une d'elles ayant été exposée aux rayons solaires, il la rentra près de l'autre

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 2ᵉ série, t. 37, p. 205.

(2) Boeckmann, *De l'action du phosphore dans différents gaz*, 1800. — *Ann. de chimie*, t. 85, p. 225 (1813).

(3) *Ann. de chimie*, t. 85, p. 225.

(4) *Ann. de chimie et de physique*, 3ᵉ série, t. 38, p. 148.

(5) *Philosoph. Magazine*, 1844 et 1845. — *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 53, p. 155, et t. 59, p. 365.

dans l'obscurité, et ajouta à chacune d'elles une même quantité d'hydrogène; en les exposant à la lumière diffuse, la combinaison se fit plus rapidement dans la cloche qui avait été insolée avant l'expérience. D'après cela, le chlore semblerait donc posséder deux états différents, comme le phosphore, le soufre, le carbone, et la modification de ce gaz serait produite par l'influence de la lumière.

Dans des recherches que j'ai faites conjointement avec M. Fremy, nous avons été conduits à une conclusion différente : Si l'on opère comme l'a indiqué M. Draper, en préparant le chlore par la méthode ordinaire et en le recevant sur l'eau salée, on obtient les résultats qu'il a indiqués Mais en desséchant le chlore, l'enfermant dans des tubes de verre scellés à la lampe, et exposant quelques-uns de ces tubes à l'action solaire, si l'on vient à faire passer le chlore dans des éprouvettes reposant sur un bain d'eau salée, après l'avoir mélangé avec un égal volume d'hydrogène, sous l'influence de la lumière diffuse, la combinaison se fait également dans les éprouvettes renfermant du chlore préalablement insolé et dans celles qui n'en renferment pas. En opérant au contraire par la même méthode avec des tubes renfermant du chlore humide, alors on obtient une différence dans les effets. La présence de l'eau intervient donc ici, et il est probable que le chlore agissant sur la vapeur d'eau sous l'influence de la lumière, il se produit des composés oxygénés du chlore dont la combinaison avec l'hydrogène sous l'action de la lumière ne se fait pas dans les mêmes conditions que celle du chlore. L'effet observé par M. Draper tient donc probablement à un mélange de vapeur d'eau avec le chlore insolé.

Je donne ici la disposition des tubes dont nous avons fait usage, car elle est très-simple, et elle servira plus tard pour d'autres réactions produites sous l'influence de la lumière. C A B fig. 44 est un tube en verre



Fig. 44.

effilé en pointe en B, et aminci en A, de façon à ce qu'on peut, à l'aide d'une lampe à alcool, fondre la partie amincie et séparer le tube A B de la partie C, tout en scellant le tube. En D se trouve une pointe

effilée, et en C le système est mis en relation avec un tube en caoutchouc ou avec un appareil qui amène le gaz dont on veut se servir. On fait passer le gaz dans le système en fermant, par fusion, la pointe D; le gaz circule alors par le tube AB et sort en B. A un moment donné, on ferme à la lampe l'extrémité B et on casse la pointe D; AB reste plein de gaz, et la sortie de l'excès de ce gaz ayant lieu par D, la pression n'augmente pas. On fond ensuite le tube dans la partie rétrécie près de A, et il se trouve scellé à ses deux extrémités et rempli de gaz sec.

Dans la même série de recherches, nous avons observé, M. Fremy et moi, que le chlore provenant de la décomposition électro-chimique de l'acide chlorhydrique et non desséché préalablement, à volume égal, agissait plus rapidement sur l'hydrogène que le chlore préparé par l'acide chlorhydrique et le peroxyde de manganèse. MM. Bunsen et Roscoe, comme on le verra dans le quatrième chapitre de ce livre, ont reconnu que la méthode de préparation du chlore pouvait influer tellement sur les effets produits, que le mélange de ce gaz, quand il était très-pur, avec l'hydrogène, pouvait détoner même à la lumière diffuse. Ces mêmes savants, dans un travail dont il sera question plus loin (1), ont été également conduits à contester l'hypothèse de M. Draper sur la différence allotropique du chlore ordinaire et du chlore insolé.

Il n'est pas impossible que le chlore puisse être modifié par l'action de la lumière, puisqu'un autre gaz, l'oxygène, peut bien se transformer en ozone par une modification allotropique due à l'influence de l'électricité; mais jusqu'ici, comme on le voit d'après les résultats précédents, ce changement dans l'état du chlore n'est pas probable et les dernières recherches faites sur ce sujet sont contraires à cette supposition.

Le verre peut éprouver des changements de teinte à la lumière; ainsi Faraday (2) a observé que le verre teint en pourpre par le manganèse prend une teinte beaucoup plus prononcée quand il a été exposé aux rayons solaires. Pelouze (3), qui s'est beaucoup occupé des causes de coloration des verres, a reconnu que des verres ordinaires pouvaient se colorer à la lumière, mais quand ils renfermaient des sels de manganèse ou de fer, et une fois la coloration obtenue, l'action de la chaleur pouvait la faire disparaître; il a également trouvé que le verre

(1) *Ann. de Poggend.*, t. 100. — *Ann. de chimie et de physiq.*, 3e série, t. 55, p. 365.
(2) *Ann. de chimie et de physique*, 2e série, t. 25, p. 99 (1824).
(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 4e série, t. 10, p. 194 (1867).

pur, exempt de sulfates, dans les mêmes circonstances ne changeait pas de nuance.

La coloration du verre à la lumière, d'après cela, semble être due à ce que le peroxyde de fer cède une partie de son oxygène au protoxyde de manganèse, qui passerait à un état d'oxydation supérieur; le recuit du verre, c'est-à-dire l'action de la température rouge sombre, produirait une réaction inverse, qui expliquerait la décoloration. Cependant, d'après Pelouze, cette théorie laisse sans explication le fait suivant : le verre préparé avec le manganèse, qui devient violet à la lumière directe du soleil et se décolore par le recuit, puisé dans un creuset avec la canne du verrier, présente une couleur améthyste si on le trempe, en le refroidissant subitement, ou, ce qui revient au même si on ne le recuit pas; ainsi la trempe donne lieu au même effet que l'insolation. On ne sait donc pas, quant à présent, si ces effets tiennent à des changements dans l'état physique des matières exposées à l'influence lumineuse ou bien à des changements dans le degré d'oxydation des sels métalliques contenus dans les verres.

M. Niepce de Saint-Victor (1) a observé que des substances comme le papier, la porcelaine, exposées à l'influence de la lumière, puis rentrées dans l'obscurité, agissent comme réducteurs sur des papiers enduits de sels d'argent que l'on met en contact avec eux, même longtemps après l'influence lumineuse. Il avait cru pouvoir expliquer ces effets en admettant une action physique, une modification persistante dans les substances insolées; mais, d'un côté, la non-altération du sel d'argent quand on interpose entre les corps insolés et la surface sensible un écran transparent à surface très-propre, quelque mince qu'il soit; d'un autre côté, l'augmentation d'effet quand la surface insolée est couverte de substances facilement altérables à la lumière, comme le nitrate d'urane et l'acide tartrique, ainsi que les expériences faites par divers observateurs, et notamment par M. l'abbé Laborde (2), ont montré que ces effets devaient être attribués à l'action réductrice exercée au contact sur les sels métalliques par les matières organiques qui avaient subi préalablement une altération chimique à la lumière. On doit remarquer encore que ce sont les rayons violets et

(1) *Bulletin de la société photographique de Paris*, t. 3, 4, 5, 7. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 45, 46, 47 et 65, p. 505.

(2) *Bulletin de la société photographique de Paris*, t. 5, p. 213.

ultra-violets qui donnent lieu à ces effets, c'est-à-dire précisément ceux qui sont doués, en général, d'activité chimique.

Les exemples que je viens de citer sont jusqu'ici ceux pour l'explication desquels on avait supposé un changement dans l'état physique des corps; d'après ce que l'on a vu, une action calorifique ou des effets chimiques peuvent rendre compte de la plupart d'entre eux. Ce n'est que lors de la coloration du verre et de celle du phosphore où un effet physique peut paraître probable, si toutefois dans ce dernier cas la matière rouge qui se produit alors n'est pas un oxyde; mais il n'y aurait aucune difficulté à admettre que la lumière, comme la chaleur, puisse donner lieu au changement si curieux que manifeste ce corps simple.

On doit remarquer qu'il est souvent très-difficile de reconnaître quel est l'effet produit par la lumière; car en admettant qu'il y ait combinaison ou décomposition chimique, elle porte parfois sur une si faible quantité de matière que l'analyse chimique ne peut servir à la distinguer; on est donc réduit à raisonner par induction en se guidant sur des réactions que l'on peut observer sur les corps avant et après l'influence de la lumière. Il serait même possible, dans le cas du mélange de deux corps, que la présence d'une fort petite quantité d'une substance sous l'influence de la lumière vînt provoquer entre eux une réaction qui ne s'effectuerait pas sans cette intervention, de même qu'une lame de platine donne lieu à la combinaison lente de l'oxygène et de l'hydrogène.

§ 2. *Combinaisons produites sous l'action de la lumière, en présence du chlore, du brome, de l'iode ou de l'oxygène; matières colorantes.*

Je citerai d'abord comme exemples des effets si nombreux produits sous l'influence de l'agent lumineux les combinaisons qui s'opèrent quand certains corps sont en présence l'un de l'autre et que l'un d'eux se combine avec le second ou avec un de ses éléments constituants, et principalement les effets observés lors de l'action du chlore, du brome, de l'iode, ou de l'oxygène sur différentes substances.

Gay-Lussac et Thenard (1) ont montré l'action bien remarquable du chlore sur l'hydrogène quand ces gaz préparés séparément sont mélangés à volumes égaux; la combinaison de ces deux corps, qui ne se pro-

(1) *Recherches physico-chimiques*, t. 2, p. 186.

duit pas à l'obscurité, s'effectue lentement à la lumière diffuse et donne lieu à une détonation sous l'action des rayons solaires; dans chaque circonstance il se forme de l'acide chlorhydrique (1). Gay-Lussac et Thenard, comme avant eux Rumfort (2), avaient pensé que les effets chimiques dus à l'action de la lumière provenaient de la chaleur développée par les divers rayons en tombant sur les corps; cependant ils ont émis des doutes relativement à cette conclusion, en faisant remarquer que les actions chimiques produites par les rayons violets sont plus énergiques que celles des autres rayons dont l'influence thermométrique est plus grande. Les recherches faites depuis cette époque ont montré en effet que l'action chimique est indépendante de la température que les corps reçoivent de l'influence lumineuse.

Le chlore a une telle tendance à se combiner avec l'hydrogène qu'un grand nombre de matières hydrogénées mises en présence de ce gaz se décomposent à la lumière diffuse ou directe, suivant leur nature, en produisant de l'acide chlorhydrique et des composés secondaires; on verra également dans le paragraphe suivant qu'un grand nombre de chlorures, et surtout de bi-chlorures, cèdent du chlore sous l'influence de la lumière aux substances hydrogénées pour former de l'acide chlorhydrique.

L'eau qui tient en dissolution du chlore, c'est-à-dire l'eau chlorée, n'éprouve aucune altération à l'obscurité, mais à la lumière diffuse elle est altérée lentement, et à la lumière solaire elle éprouve une décomposition rapide; dans ce dernier cas on voit des bulles de gaz se dégager et gagner la partie supérieure du liquide. Voici quel est l'effet produit: l'eau se décompose, l'hydrogène s'unit avec le chlore en formant de l'acide chlorhydrique qui reste en dissolution, et il y a formation d'une certaine quantité d'acide chlorique ainsi que dégagement d'oxygène (3).

(1) On peut, dans les cours publics, faire une expérience qui met en évidence la combinaison lente du chlore et de l'hydrogène mélangés ensemble : on dispose un mégascope devant la flamme du chalumeau à gaz oxygène et hydrogène tombant sur la chaux, afin de projeter sur un écran, placé au delà, l'image des objets placés sur la route du faisceau lumineux. Sur le trajet du faisceau de ces rayons on place une petite éprouvette contenant le mélange de chlore et d'hydrogène renversée sur l'eau salée, et l'action des rayons ne donne lieu qu'à une combinaison lente, qui est rendue sensible par l'ascension du liquide dans l'éprouvette.

On verra plus loin que si les gaz sont préparés ensemble par la décomposition électrolytique, alors le mélange peut détonner sous l'influence d'une lumière relativement bien moins intense.

(2) *Annales de chimie*, t. 33.

(3) Voir *Ann. de Poggend.*, t. 94, p. 597, un mém. de M. Wittwer, puis un autre de MM. Bunsen et Roscoe, t. 96, p. 373 et t. 97, p. 304.

La plupart des hydrogènes carbonés sont décomposés à la lumière par le chlore; indépendamment de l'acide chlorhydrique, il en résulte des produits chlorés. On peut citer, entre autres, les résultats suivants (1) :

Chlore et gaz des marais ($C^4 H^8$). A l'obscurité aucun effet; à la lumière diffuse action lente; à la lumière solaire action vive et détonation. Il se forme successivement les produits $C^4 H^6 Cl^2$, $C^4 H^4 Cl^4$, $C^4 H^2 Cl^6$ (chloroforme) et enfin avec un excès de chlore ; il se produit du de chlorure carbone $C^4 Cl^8$.

Chlore et gaz oléfiant ($C^8 H^8$). Aucune action à l'ombre ; à la lumière diffuse action assez rapide; à la lumière solaire action rapide sans détonation. Avec des volumes égaux de ces deux gaz, il se forme un composé, la liqueur des Hollandais, dont la formule chimique est $C^8 H^8 Cl^4$, ou mieux, d'après ses réactions, $C^8 H^6 Cl^2 + Cl^2 H^2$. Par l'action prolongée du chlore, on a, d'après M. Regnault, différents produits et enfin $C^8 Cl^{12}$, le sesqui-chlorure de carbone.

Chlore et benzine ($C^{24} H^{12}$). A l'obscurité aucun effet; à la lumière diffuse action lente; à la lumière solaire action plus vive, et formation du composé $C^{24} H^{12} Cl^{12}$, c'est-à-dire $C^{24} H^6 Cl^6 + H^6 Cl^6$.

Chlore et naphtaline ($C^{10} H^4$). Peut-être action à l'obscurité; à la lumière diffuse, comme au soleil, action vive, dégagement abondant d'hydrogène et formation d'une série de produits qui dérivent de la naphtaline. La plupart des hydrogènes carbonés liquides ou solides éprouvent de la part du chlore une action analogue à celle de cette dernière substance.

D'autres composés organiques, comme l'acide acétique, l'éther sulfurique, l'alcool, etc., donnent divers produits quand ils sont soumis à l'action lumineuse en présence du chlore :

Chlore et acide acétique ($C^8 H^6 O^3 + H^2 O$). A l'obscurité aucun effet; à la lumière solaire action très-vive et formation d'acide chloracétique $C^8 Cl^6 O^3 + H^2 O$.

Chlore et éther sulfurique ($C^8 H^{10} O$ ou $C^8 H^8 + H^2 O$). A l'obscurité l'action n'a pas été examinée; à la lumière diffuse, action assez vive, élévation de température et formation d'un produit qui n'est pas altéré par le chlore, quelle que soit la durée de l'action, et dont la composition est $C^8 H^6 O Cl^4$.

(1) Becquerel, *Traité de physique*, t. 2, p. 492. — Voir les mémoires de M. Regnault et de M. Laurent, *Ann. de chim. et de physique*, 2e série, t. 60 à 71.

Chlore et alcool. Réaction lente à la lumière diffuse et qui devient très-vive au soleil; il se forme des produits divers qui n'ont pas été examinés. Si l'on fait passer des bulles de chlore dans de l'alcool saturé de chlore renfermé dans un flacon exposé au soleil, à chaque bulle qui sort du tube il y a détonation, formation d'acide chlorhydrique et dépôt de charbon.

Le chlore et l'acide cyanhydrique, suivant Serullas, donnent par leur réaction, sous l'influence solaire, de l'acide chlorhydrique et du perchlorure de cyanogène.

Un certain nombre de chlorures métalliques qui peuvent passer à un état de chloruration moindre réagissent sur plusieurs composés hydrogènes sous l'influence de la lumière en cédant du chlore; ainsi le perchlorure de fer dissous dans l'alcool et exposé aux rayons solaires laisse déposer de l'oxyde de fer; l'alcool se décolore, et il se forme des produits éthérés. Nous reviendrons sur ces effets en traitant de la décomposition des composés métalliques.

Le brome et l'iode se comportent comme le chlore à l'égard de l'hydrogène, sous l'influence des rayons lumineux, avec cette différence toutefois que les effets ne sont pas aussi énergiques; le brome agit moins vivement que le chlore, et l'iode moins que le brome. Ainsi le brome et le gaz des marais exposés aux rayons solaires ne présentent qu'une action à peine appréciable; mais le brome donne avec le gaz oléfiant un composé du même genre que celui qui se forme avec le chlore. L'iode et le gaz des marais ne donnent lieu à aucune réaction à la lumière; l'iode et le gaz oléfiant, dans les mêmes conditions, forment un produit analogue à la liqueur des Hollandais, et qui est facilement décomposé, soit par la chaleur, soit spontanément.

Plusieurs combinaisons de plomb sont sensibles à l'influence des rayons solaires, et parmi eux le protoxyde de plomb; il est facile de prouver que l'effet est dû à une oxydation de la matière par l'oxygène de l'air atmosphérique. Le protoxyde de plomb a un état physique dépendant de son arrangement moléculaire; suivant qu'il a été chauffé ou fondu il est à l'état de massicot ou de litharge. Si on le prépare en faisant bouillir de l'hydrate de plomb dans la potasse, il est anhydre, offre une teinte jaune paille, et paraît formé de petits grains cristallins. Dans cet état, il est impressionnable à l'action des rayons solaires ou à celle de la lumière diffuse prolongée, et prend une teinte plus foncée.

J'ai placé cet oxyde dans des tubes semblables à ceux de la fig. 44.

Dans le vide ou dans l'hydrogène sec, à la lumière solaire, il n'y a aucun changement au bout de plusieurs jours; dans l'air sec, au contraire, la poudre se colore, ce qui montre que l'oxygène est nécessaire pour la réaction, et en agitant la masse, au bout de plusieurs mois, elle a une couleur orangée indiquant sa transformation partielle en minium; l'oxydation de la matière est donc manifeste. Je dois faire remarquer que dans les flacons contenant cet oxyde jaune et qui sont exposés à la lumière, la teinte de la matière n'est pas orangée contre les parois et tourne au brun; quand on fixe l'oxyde sur du papier avec un peu de gomme, on a la même nuance; il est donc possible que le minium, une fois produit, se transforme en peroxyde et que ce soit ce composé qui donne la teinte brune observée alors, car le minium se colore également à la lumière, mais moins rapidement que le protoxyde de plomb.

Lorsque le protoxyde jaune de plomb est placé sous une cloche et que l'humidité et l'acide carbonique de l'air peuvent agir sur lui en même temps que la lumière, on peut voir d'autres nuances se produire : j'avais abandonné une certaine quantité d'oxyde jaune pendant deux ans à l'action simultanée de la lumière diffuse ou solaire et de l'atmosphère, en le couvrant d'une cloche; on remuait la masse tous les deux ou trois jours : au bout de peu de temps la matière qui avait d'abord bruni est devenue plus pâle, et à la fin elle avait une teinte blanche grisâtre. L'analyse a montré que le protoxyde PbO s'était transformé en hydrocarbonate ou $PbO\ Co^2 + PbO\ HO$ (1). Ainsi, l'acide carbonique et l'eau avaient altéré le composé au point de faire disparaître toute trace de l'action lumineuse.

J'ai remarqué que lorsqu'on fait chauffer légèrement le carbonate de plomb, on obtient du protoxyde qui est également d'un jaune pâle; il ne faut pas élever beaucoup la température, car la teinte tourne de suite à l'orangé. En étendant cette matière pulvérulente jaune pâle sur du papier, elle brunit à la lumière comme l'oxyde dont il vient d'être question; cette coloration a lieu, dans l'un et l'autre cas, sous des verres blancs et bleus, et nullement sous des verres rouges ou jaunes; ce qui montre que l'action est produite par les rayons les plus réfrangibles de la lumière. Je dois mentionner ici une observation assez intéressante; une feuille de papier recouverte de ce composé, primitivement un peu colorée à la lumière diffuse, a présenté une déco-

(1) Cette analyse a été faite par M. Cloëz.

loration sous l'influence des verres jaunes et rouges. Je n'ai pas eu occasion de répéter cette observation et de savoir, si dans ce cas, comme peut-être avec le gaïac, dont on parlera ci-après, il ne se produirait pas un effet chimique opposé au premier, c'est-à-dire une destruction du nouveau corps formé par l'action de la lumière, ou bien si la réaction manifestée en second lieu ne produirait pas un oxyde de plomb ayant un autre degré d'oxydation; c'est une question qui reste à éclaircir.

L'oxygène sous l'influence de la lumière peut s'unir non-seulement à plusieurs composés métalliques, mais encore à un très-grand nombre de substances de la nature organique, et donner lieu à une foule de réactions que l'on n'apprécie souvent que lorsqu'elles sont accompagnées d'un changement de couleur. Ces matières sont pour ainsi dire brûlées par l'action des rayons lumineux. On peut citer d'abord, comme exemple de ces effets, les changements observés avec la résine de gaïac.

On avait remarqué que cette résine se colorait à la lumière (1); mais Wollaston (2) a analysé l'action des différents rayons colorés sur cette substance. Il a reconnu que si l'on imbibe une feuille de papier avec une solution alcoolique de cette résine, ce papier paraît jaunâtre à l'obscurité, mais change de couleur à la lumière diffuse ou solaire et devient promptement verdâtre puis vert bleuâtre. Comme les corps oxydants tels que le chlore, le brome, lui donnent cette couleur, l'effet produit doit résulter d'une action de l'oxygène de l'air sur la résine, sous l'influence de la lumière. Ce n'est pas le seul effet observé avec cette matière; cette coloration bleue, comme Wollaston l'a vu, et comme on le dira plus loin, est donnée par les rayons violets, tandis que les rayons rouges et jaunes du spectre décolorent la matière colorée, et lui donnent une teinte jaunâtre indiquant une destruction du produit de l'oxydation provoquée par les rayons les plus réfrangibles. Les rayons les moins réfrangibles exercent-ils en effet une action inverse de celle des rayons les plus réfrangibles, ou bien la matière bleue, subissant l'effet ordinaire de la plupart des matières colorantes, n'est-elle pas détruite à son tour par la lumière? C'est un point qui reste à décider.

On doit dire, cependant, que si l'on fait agir simultanément sur la résine

(1) Senebier, *Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière*, etc.; Genève, 1782, t. 2, p. 408.

(2) *Journal de Nicholson*, t. 8, p. 293 (1804).

de gaïac une certaine partie des rayons les plus réfrangibles avec les rayons les moins réfrangibles, la matière ne change pas sensiblement de nuance, fait qui serait favorable à la première hypothèse; d'un autre côté, j'ai observé qu'une feuille de papier enduite de gaïac et bleuie par le chlore se décolore rapidement dans un tube vide au soleil, et le papier étant ainsi resté pendant plusieurs jours au soleil, traité de nouveau par le chlore, n'a pas repris sa couleur bleue primitive; il n'a présenté qu'une nuance verdâtre faible; ainsi la matière avait été altérée et n'était pas simplement revenue à son état initial. On peut aisément démontrer la nécessité de la présence de l'oxygène pour la coloration de la résine de gaïac; on prend un tube préparé comme le tube AB fig. 44, page 48, dans lequel on met des bandes de papier préparé, et ou l'on fait le vide ou bien que l'on remplit de gaz hydrogène; dans l'un ou l'autre cas, le papier reste avec la teinte jaunâtre primitive malgré une longue exposition au soleil. Quelques traces d'oxygène lui donnent au contraire une coloration sous l'influence de la lumière.

M. Biot a montré que le principe actif de la résine de gaiac est une matière qui se colore en bleu à la lumière, et que les teintes ne paraissent verdâtres sur le papier qu'en raison de son mélange avec une matière jaune inactive (1); la matière jaune est soluble dans l'eau et dans l'alcool; la matière qui bleuit n'est soluble que dans l'alcool. On les sépare de la manière suivante : on fait bouillir la résine de gaiac, ou bien le bois de gaïac, dans de l'eau pour enlever la matière jaune extractive; après plusieurs lavages à l'eau, on sèche cette résine ou ce bois et on le traite avec de l'alcool; on se sert ensuite de cette teinture alcoolique pour imbiber des feuilles de papier, et on a des surfaces qui deviennent bleues à la lumière au lieu de devenir bleues-verdâtres.

La plupart des matières organiques éprouvent des effets d'oxydation analogues, et donnent des produits plus ou moins stables; lorsqu'il y a changement de nuance ou décoloration à la lumière, l'effet est indiqué par ce résultat seul. On sait que la plupart des matières colorantes isolées, ou fixées sur des étoffes, s'altèrent sous l'action de la lumière, et on verra dans le chapitre suivant quelles sont les parties du spectre solaire qui agissent sur un certain nombre d'entre elles. Senebier (2),

(1) *Comptes rendus de l'Institut de France*, t. 8, p. 598.

(2) *Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière solaire*, etc..., t. 3, p. 211 (1782).

dans ses mémoires relatifs à l'action de la lumière, a donné des indications sur des altérations de ce genre observées avec des matières colorantes isolées ou tenues en dissolution.

M. Chevreul, dans le cours de ses recherches sur la teinture (1), a étudié d'une manière complète les changements qu'un certain nombre de matières colorantes fixées sur des étoffes de coton, de soie, de laine éprouvent de la part de la lumière, des agents atmosphériques et du gaz hydrogène, ainsi que l'influence que peut avoir sur les changements observés la nature des corps sur lesquels est fixée la matière. Il a reconnu que dans le vide sous l'influence de la lumière le rocou, le carthame, l'orseille, l'acide sulfo-indigotique, l'indigo, n'ont pas été sensiblement altérés pendant deux ans, mais que la décoloration a eu lieu dans l'air, de sorte qu'il faut le concours de l'oxygène pour la produire. Le curcuma a présenté dans le vide une décoloration indiquant peut-être la présence de l'oxygène dans l'appareil où l'on a opéré, ou bien la décomposition de la substance. Quant au bleu de Prusse (cyanure de fer), il subit une altération dont il sera question dans le paragraphe suivant. Les dispositions expérimentales indiquées dans les mémoires de M. Chevreul sont très-propres à mettre en évidence l'influence de la lumière sur les matières colorantes.

Lorsque les matières organiques n'éprouvent aucun changement de couleur, elles peuvent subir l'influence de la lumière, mais alors les effets sont plus difficiles à distinguer. On peut citer les hydrogènes carbonés, les huiles essentielles comme présentant sous l'action des rayons solaires des effets plus ou moins énergiques. Pour observer ces réactions on peut remplir de petites éprouvettes avec du gaz oxygène et les placer, en les renversant, dans des vases contenant une certaine quantité du liquide que l'on veut étudier, comme l'essence de térébenthine, la benzine, etc.; on en place une à l'obscurité, l'autre à l'action des rayons solaires, et au bout de quelques heures on compare les effets produits dans les deux appareils. La plupart des huiles essentielles indiquent, dans ces conditions, une absorption d'oxygène et par conséquent leur combinaison avec ce gaz.

M. Jodin (2), qui s'est occupé de l'action chimique que la lumière exerce sur un certain nombre de matières d'origine végétale, parmi lesquelles

(1) Chevreul, 4e *mémoire sur la teinture. Mém. de l'Académie des sciences*, t. 16, p. 53 (1838).

(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, tom. 59, p. 857 ; 1864.

on peut citer l'huile essentielle de lavande et l'essence de térébenthine, a reconnu qu'une solution alcoolique de tannin peut se conserver presque indéfiniment à l'obscurité, au contact de l'air, sans absorber de l'oxygène, mais qu'il n'en est plus ainsi quand on l'expose à la lumière : l'oxygène est alors absorbé. Les solutions aqueuses de ce corps se comportent de même.

Une solution alcoolique de chlorophylle s'oxyde également dans les mêmes circonstances, de sorte que cette matière, qui sous l'empire de la vie végétale est formée par l'action de la lumière, se brûle, comme la plupart des principes immédiats de la nature organique, quand elle est soumise à l'influence du rayonnement lumineux hors des tissus dans lesquels elle était renfermée.

Le changement de solubilité du bitume de Judée sous l'influence de la lumière, comme on le verra dans le livre III, tient à une action de ce genre. Les huiles grasses et les corps gras éprouvent, comme on le sait, une oxydation lente au contact de l'air; cette oxydation, qui est activée par la chaleur, est aussi rendue plus rapide par la lumière, et non-seulement, comme l'a observé M. Cloëz (1), l'intensité de la lumière a une action bien manifeste, mais encore sa composition, car l'oxydation de ces matières a lieu plus rapidement sous l'influence des rayons les plus réfrangibles bleus et violets que sous l'action des rayons les moins deviés par le prisme. M. l'abbé Laborde (2) a utilisé l'action chimique exercée par la lumière sur l'huile de lin combinée à l'oxyde de plomb, et ainsi qu'on le verra plus loin, pour préparer un vernis impressionnable destiné à la formation des gravures photographiques.

Cette action oxydante peut se manifester encore lors de l'action de la lumière sur les substances comme l'acide tartrique, etc., et l'on a vu page 50 que l'on devait probablement attribuer aux composés résultant de cette action les effets réducteurs que peuvent produire ces substances lorsqu'elles sont en contact avec certains sels métalliques, effets que l'on avait attribué à toute autre cause (3).

Ainsi, les effets présentés par les matières colorantes, comme par d'autres matières organiques, montrent que l'action de la lumière détermine, en général, la combinaison de l'oxygène avec un ou plusieurs éléments constituants de la substance. On peut facilement

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 61, p. 321 et 981 (1865).
(2) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 4, p. 213 (1858).
(3) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 5, p. 213 (1859).

étudier quelques-uns des effets dont il s'agit ici en se servant de tubes semblables à celui de la figure 44, dans lesquels on a fait le vide ou que l'on a remplis de différents gaz comme l'azote et l'hydrogène. Du reste, il en sera question dans le chapitre II, lorsqu'on traitera de l'action du spectre solaire sur les matières chimiquement impressionnables.

§ 3. *Décompositions produites sous l'influence de la lumière. Combinaisons d'argent, d'or, de platine, de mercure, de fer, etc.; substances organiques.*

Le nombre des substances qui donnent lieu à des réactions sous l'influence de la lumière, ou qui sont décomposées en partie ou en totalité, est très-considérable; on ne citera ici que celles qui conduisent aux résultats les plus nets et les mieux établis. La lumière, comme la chaleur, peut donner lieu à des réactions diverses même sur une seule matière, et les différences observées tiennent le plus ordinairement à la réfrangibilité des rayons actifs.

En général, les sels des métaux qui ont plusieurs degrés d'oxydation sont impressionnables quand ils sont à l'état de sels de peroxyde, car ils tendent à passer à un degré inférieur d'oxydation sous l'influence de l'agent lumineux. La lumière peut en effet agir sur eux en exerçant une action réductrice, soit quand ils sont isolés, ce qui est le moins fréquent, soit la plupart du temps lorsqu'ils se trouvent mélangés à des composés réducteurs, qui sont presque toujours des substances organiques; ces dernières se brûlent donc à la lumière aux dépens des éléments de la substance impressionnable. Ainsi le mélange d'un corps avec une substance qui puisse lui enlever ou lui céder un de ses éléments constituants favorise l'action de la lumière, et la plupart du temps la détermine quand elle n'aurait pas eu lieu sans cela.

L'état physique des corps impressionnables peut exercer une action très-marquée sur les effets produits : ainsi, parmi les sels d'argent obtenus à l'état de précipitation par double décomposition, le chlorure et le bromure sont très-sensibles, l'iodure ne l'est pas. Lorsque ces mêmes composés sont préparés à la surface de lames d'argent à l'aide des vapeurs d'iode, de brome ou du chlore, l'iodure est au contraire très-sensible, le bromure moins, et le chlorure donne des effets particuliers, dont on parlera plus tard. Si l'iodure déposé sur une lame d'argent est exposé pendant un temps très-court aux émanations du

brome ou du chlore, alors la couche peut devenir soixante fois plus impressionnable qu'avant cette réaction. Mais quand les sels d'argent sont préparés sur du papier par voie de double décomposition, l'état d'humidité influe sur la sensibilité du papier : humides, ils sont rapidement colorés à la lumière ; secs, ils le sont moins promptement.

Combinaisons d'argent. — Parmi les substances impressionnables, les composés d'argent sont certainement ceux qui donnent les résultats les plus intéressants pour l'étude du rayonnement lumineux. L'oxyde d'argent AgO, même isolé, à l'abri de toute matière organique et déposé sur du verre (1), est impressionnable à la lumière et noircit; il est probable qu'il se produit une désoxydation partielle ou totale, mais probablement partielle, et, d'après M. Hunt, la réduction complète du métal ne peut être obtenue que par l'intervention d'une matière organique. Cette action est analogue à celle que l'on va étudier ci-après avec le chlorure, l'iodure et le bromure du même métal. On peut préparer des papiers sensitifs à l'aide de cette substance, en trempant une feuille de papier dans une solution d'azotate d'argent, puis quand elle est sèche, en la lavant dans une solution étendue de potasse. L'oxyde d'argent formé à la surface du papier est rapidement noirci à la lumière.

Le chlorure d'argent ($Ag\,Cl^2$), que l'on obtient par double décomposition entre une dissolution d'un sel d'argent et une autre d'un chlorure, est un composé d'un blanc éclatant; aussitôt qu'il reçoit l'influence de la lumière diffuse ou solaire, il se colore, commence par prendre dans les premiers instants une teinte bleuâtre, qui passe au violet et bientôt au brun, mais prend une teinte de plus en plus foncée. Si le chlorure est parfaitement sec, à mesure qu'il se colore il émet du chlore, de sorte que l'action de la lumière lui fait subir une espèce de réduction. Cette action est toute spéciale de la part de l'agent lumineux, car en chauffant le chlorure d'argent, on le fond sans le colorer, tandis que l'influence de la lumière solaire ou des lumières artificielles donne lieu à cette réaction.

Si on laisse la lumière agir pendant longtemps sur du chlorure sec, on trouve que la composition de ce corps s'approche d'être celle de $Ag_2\,Cl$, c'est-à-dire d'un sous-chlorure, contenant seulement un équivalent de chlore. Mais on a supposé que la lumière pouvait donner lieu à une réduction complète, et qu'en définitive si l'action lumineuse était épuisée,

(1) Hunt. *Philosoph. mag.*, oct. 1845. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. 59, p. 260.

il ne resterait que de l'argent métallique. Je ne crois pas que l'effet soit aussi simple, et je pense qu'il y a d'abord formation d'un sous-chlorure violet Ag Cl, et que ce dernier peut être décomposé à son tour par une action suffisamment intense et prolongée. Les observations sur lesquelles on peut se fonder pour soutenir cette opinion sont les suivantes :

1° Le chlorure altéré par la lumière se dédouble instantanément par l'action des dissolvants du chlorure blanc comme l'ammoniaque, l'hyposulfite de soude, les chlorures alcalines, etc. : du chlorure blanc se dissout et de l'argent métallique reste. Cet argent se dissout ensuite facilement dans l'acide azotique. Or, si l'on traite de suite par l'acide azotique le chlorure altéré à la lumière, ce n'est que très-lentement que ce composé éprouve un changement et donne lieu à une dissolution d'argent.

2° Quand on a une surface sur laquelle se trouve une couche de chlorure d'argent déjà coloré par la lumière, le spectre solaire, comme on le verra plus loin, donne à cette couche impressionnée des teintes particulières, dans le rouge et le bleu du spectre ; ces teintes étant analogues à celles du sous-chlorure formé directement sans l'intervention lumineuse, il est donc probable que ce composé existe dans le chlorure impressionné. Si ce dernier était formé d'un mélange d'argent et de chlorure blanc, on n'observerait aucun effet de ce genre.

Wetzlar (1) a reproduit chimiquement une matière analogue au sous-chlorure violet en versant du bichlorure de fer ou de cuivre sur des lames d'argent en feuilles ; l'argent se réduit de suite en petites paillettes noires violacées, que l'on lave aussitôt, car un contact plus prolongé donnerait naissance à du chlorure blanc.

J'ai analysé deux échantillons de ce produit préparé de la manière suivante : le bichlorure de cuivre a été formé par un mélange de sel marin et de sulfate ou d'azotate de cuivre, et l'on a projeté dans cette solution de l'argent nouvellement précipité sur du zinc ; aussitôt il s'est formé une poudre violette qui a été lavée dans l'eau bouillante.

1 gr. de matière traité par l'eau régale a donné 1 gr. 132 de chlorure blanc. Le chlorure blanc $Ag Cl^2$ étant formé de 0,753 d'argent et 0,247 de chlore, on a pour le poids des éléments dans la matière d'essai :

Argent, 0,853	ou	85,3
Chlore, 0,147		14,7
Total, 1 gr.		100.

(1) Berzelius, *Traité de chimie*, 2me édit. française, 1847, t. 4, p. 260.

En admettant la formule Ag Cl, on aurait dû trouver 85,9 d'argent et 14,1 de chlore.

Une autre quantité de 1 gr. de matière traitée par l'ammoniaque a donné un résidu d'argent de 0, gr. 42. Le chlorure blanc dissous précipité par l'acide azotique pesait 0, gr. 56, et renfermait 0, gr. 423 d'argent et 0,137 de chlore; la composition de la matière était donc :

Argent.	84,3
Chlore.	13,7
Total.	98,

et la perte a été de 2 milligr. On voit que la composition est sensiblement celle de Ag Cl. D'un autre côté, M. Wohler a obtenu comme résidu du traitement du mellitate d'argent porté à 100° une matière qui paraît contenir l'argent à l'état de protoxyde ; l'acide chlorydrique y forme un précipité brun qui pourrait être analogue au sous-chlorure Ag Cl. On doit observer que si la réaction qui a lieu sur le chlorure blanc sous l'action de la lumière commence par donner lieu au sous-chlorure Ag Cl, comme ce composé est lui-même altéré par la lumière, il est probable que l'effet final sur le chlorure blanc doit tendre à une réduction complète, à moins qu'il ne se forme un composé encore moins chloruré que Ag Cl.

Le chlorure d'argent peut être déposé sur la surface du papier, du carton, ou sur une couche de collodion appliquée sur le verre ; on le produit alors par double décomposition, en imprégnant la surface avec un chlorure, puis en plongeant celle-ci dans une dissolution d'azotate d'argent. Mais dans ces conditions la présence du composé soluble d'argent, de l'azotate, a une influence sur l'effet produit par la lumière; non-seulement la sensibilité du corps est augmentée, mais l'effet produit par le spectre solaire est différend; en effet, on verra dans le chapitre suivant que l'action s'étend un peu plus loin du côté du vert, et, en outre, que la substance préalablement impressionnée est sensible entre le bleu et le rouge prismatique. Du reste, le mélange des matières impressionnables et des composés organiques réducteurs a une très-grande influence sur l'altération des sels métalliques et est utilisé dans la photographie.

MM. Davanne et Girard (1) pensent que l'azotate d'argent mélangé au chlorure n'agit que par sa présence en absorbant le chlore au mo-

(1) *Recherches sur la formation des images photographiques;* Paris, 1864 p. 36.

ment de la décomposition du chlorure insolé, et en fournissant une nouvelle quantité de chlorure qui est de nouveau décomposée, etc...; de sorte qu'une certaine quantité de chlorure peut donner lieu à une quantité d'argent réduit plus grande que celle qu'il contient. Il est possible que l'action exercée sur le chlore provenant de la décomposition du chlorure augmente la sensibilité de cette dernière substance; mais l'influence particulière que les rayons orangés jaunes et verts exercent sur le chlorure d'argent en présence de l'azotate de cette base, comme on le verra dans le chapitre suivant, indique une action différente de celle qui est produite sur le chlorure blanc isolé.

On a supposé que le chlorure d'argent formé par double décomposition était précipité et même fondu, et qu'il était fixé sur un corps servant de support. Si on l'obtient en attaquant directement une lame d'argent par le chlore, il donne des couches grisâtres ou violacées, en général moins impressionnables, mais présentant d'autres effets qui seront étudiés plus loin avec détails dans le quatrième chapitre du livre III, relatif à la photographie.

Le bromure d'argent préparé par voie de double décomposition offre à la lumière des effets analogues à ceux du chlorure; seulement, son altérabilité paraît être plus grande; sa coloration est noire verdâtre. Obtenu par double décomposition à la surface du papier, du collodion, etc., et en présence de l'azotate d'argent et de différents sels, il donne des effets analogues.

L'iodure d'argent, qui en général se comporte de même, peut donner cependant des effets dépendant des circonstances dans lesquelles on le produit. Ce corps, obtenu par double décomposition, est jaunâtre, et quand il est neutre et bien lavé, il n'est pas impressionnable à la lumière; mais vient-il à être mélangé d'azotate d'argent, il le devient à un très-haut degré. Pour répéter cette expérience, on prépare de l'iodure d'argent précipité jaune, au moyen de l'iodure de potassium et de l'azotate d'argent; on lave bien ce composé et on le place dans deux capsules que l'on peut exposer, sous des cloches en verre, à l'action des rayons solaires; dans une des capsules, on met l'iodure isolé et pur; dans l'autre, on ajoute quelques gouttes d'une dissolution de d'azotate d'argent qui mouille l'iodure. Après avoir exposé les deux capsules à la lumière pendant plusieurs heures, on reconnaît que l'iodure isolé n'est pas altéré, tandis que celui qui est imprégné d'azotate est rapidement coloré en noir.

Dans cette circonstance, l'action de l'azotate d'argent, ainsi que celle d'autres composés de ce métal, augmente l'impressionnabilité de l'iodure, non-seulement en s'emparant de l'iode lors de l'insolation, mais encore en aidant à l'action réductrice de la lumière. Le chlorure et le bromure d'argent placés dans les mêmes conditions deviennent également plus impressionnables que lorsqu'ils sont isolés.

M. Poitevin, qui partage cette opinion (1), a trouvé qu'une dissolution de tannin produit le même effet que l'azotate d'argent et donne à l'iodure d'argent précipité et inactif une sensibilité aussi grande que celle que l'azotate peut lui communiquer.

On peut obtenir l'iodure d'argent en attaquant directement une lame d'argent avec la vapeur d'iode; cet iodure est très-impressionnable à la lumière, et donne naissance à un composé analogue au sous-chlorure et au sous-bromure. Daguerre a découvert la préparation de cette couche sensible dont il a fait usage pour fixer les images de la chambre noire. La présence de l'argent semble donner à l'iodure le même accroissement de sensibilité que lui donne un sel soluble d'argent quand on le prépare à l'état de précipité. Quand l'iodure préparé sur les lames de plaqué d'argent est mélangé de chlorure ou de bromure, sa sensibilité est de beaucoup augmentée, car on verra plus tard que le brome donne à ce composé une impressionnabilité qui peut devenir 60 fois plus grande que celle qu'il possède.

L'analogie entre les trois composés, chlorure, bromure et iodure d'argent, se retrouve dans la plupart des actions que la lumière exerce sur eux et dans celles des réactifs chimiques. Ainsi, presque tous les corps qui dissolvent ces sels opèrent la décomposition des sous-combinaisons formées sous l'influence de la lumière, en donnant naissance à de l'argent métallique et à un chlorure, bromure ou iodure qui se dissout; mais l'hyposulfite de soude est un des dissolvants qui facilitent le plus cette décomposition.

On vient de voir que le chlorure et le bromure d'argent, même isolés des matières organiques ou de la présence d'autres corps, étaient altérés par la lumière; il en est de même de la plupart des composés binaires de l'argent. Mais les composés ternaires ou quaternaires, les sels tels que l'azotate d'argent, le sulfate, etc., généralement ne sont pas altérés, à moins de se trouver en présence de matières organiques qui jouent le

(1) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 9, p. 306.

rôle de réducteurs; comme résultat final, il se produit alors de l'argent métallique. Ainsi l'azotate d'argent cristallisé ou fondu mis dans un tube à l'abri des matières organiques n'est pas altéré par les rayons lumineux ; en présence du papier, du collodion, de la gélatine, il donne rapidement de l'argent métallique. Le charbon sous l'influence de la lumière exerce également un pouvoir réducteur sur l'azotate d'argent : quand on place dans une éprouvette une dissolution de ce sel dans laquelle se trouve un morceau de charbon, à l'obscurité on n'observe rien, mais à la lumière il se dépose de l'argent métallique sur la surface de ce corps.

Je citerai encore la réaction produite entre l'iodure de potassium ou de sodium et l'argent : en mettant en digestion de l'argent métallique nouvellement précipité avec une solution assez concentrée d'iodure de potassium, il y a double décomposition ; il se forme de l'iodure d'argent, et la base est mise en liberté. Avec une solution faible de sel, l'action est très-lente, mais elle est accélerée par la lumière. On indiquera plus loin l'effet produit par le spectre lumineux sur une feuille de papier recouverte d'argent réduit et lavé avec une couche plus ou moins concentrée d'un iodure alcalin.

Un très-grand nombre de sels métalliques éprouvent une altération de la part de la lumière ; mais, sauf pour quelques-uns, on n'a pas fait une étude aussi étendue qu'à l'égard des composés d'argent ; on n'a observé que les actions les plus frappantes, et il est probable que des recherches spéciales feraient connaître des réactions qui, n'étant pas aussi promptes, ne donnent lieu qu'à des effets moins facilement appréciables. Je vais parler des principales observations qui ont été faites avec différents composés métalliques.

Composés d'or. — Les combinaisons d'or éprouvent de la part de la lumière une action réductrice analogue à celle des composés d'argent ; parmi eux on peut citer le chlorure, l'oxyde d'or ; mais les réactions n'étant pas très-promptes, elles ont été peu examinées. Néanmoins, comme on le verra dans les paragraphes suivants, on a fait usage du papier enduit de chlorure d'or pour étudier l'action de la lumière. La dissolution de chlorure d'or dans laquelle on plonge du charbon donne également, comme l'azotate d'argent, du métal réduit sur le charbon quand on l'expose aux rayons solaires.

Sels de platine. — Quelques composés de platine sont également impressionnables à la lumière, et donnent lieu à des effets analogues à

ceux que l'on observe avec les combinaisons d'or. Une réaction assez curieuse se produit avec le chlorure de platine (1) : quand, après avoir fait dissoudre du platine dans l'eau régale, on neutralise l'excès d'acide avec de la chaux, en filtrant le liquide et en le mélangeant avec de l'eau de chaux, ce mélange reste limpide quand on le conserve à l'obscurité ; mais s'il est exposé à l'action des rayons solaires, il donne immédiatement lieu à un précipité. A la lumière diffuse, l'action a lieu plus lentement. Le précipité est de l'oxyde de platine, et il se manifeste dans cette circonstance, le même effet qu'avec certains sels de peroxyde de fer, d'urane et de mercure, dont il va être question; il y a décomposition partielle du composé et passage du métal de l'état de bichlorure à l'état de protochlorure. M. J. Herschell a observé que l'effet était produit par l'extrémité violette du spectre.

Sels de molybdène. — Une réduction partielle s'observe aussi avec le sulfate de molybdène qui, d'après l'observation de M. Phypson (2), se colore en bleu à la lumière, pour perdre sa couleur à l'obscurité en reprenant de l'oxygène.

Combinaisons de plomb. — Plusieurs composés de plomb sont sensibles à l'influence des rayons solaires, et l'on a vu dans le paragraphe précédent, page 54, que le protoxyde de plomb s'oxydait alors en présence de l'air. Le minium se colore aussi à la lumière, mais moins rapidement que le protoxyde jaune. Le peroxyde, d'après Davy (3), quand il est humide, changerait également de couleur, et ce changement aurait lieu dans les rayons rouges, tandis que dans le violet du spectre il ne serait pas affecté. J'ai cru observer une légère décoloration sur du peroxyde puce de plomb très-pur exposé pendant quelque temps à la lumière sous un verre blanc; c'est un sujet qui mérite d'être étudié de nouveau.

L'iodure de plomb éprouve sous l'influence solaire une altération sensible (4); mais la décomposition de l'iodure et le départ de l'iode sont rendus bien manifestes en mélangeant ce corps, après sa précipitation, avec une gelée d'amidon (5), qui a la propriété de se colorer en bleu par

(1) *Philos. magas.*, juin 1832. — Herschel, *Traité d'optique*, traduct. franç., tom. 2, p. 582.

(2) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 9, p. 286.

(3) Davy, *Éléments de philosophie chimique*; traduct. de van Mons, t. 1, p. 335.

(4) Becquerel, *Traité de physique*, t. 2, p. 497.

(5) Mémoire de M. Roussieu, *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 2, p. 149.

les moindres traces d'iode en formant de l'iodure bleu d'amidon. La teinte de l'iodure, au lieu de rester jaune, devient verte plus ou moins foncée, par suite du mélange des deux couleurs jaunes et bleues. On peut même obtenir ainsi un papier sensitif dont l'iodure de plomb est la matière impressionnable.

Combinaisons de cuivre. — Une plaque de cuivre exposée à la vapeur d'iode, comme la plaque daguerrienne, se recouvre d'une couche d'iodure faiblement impressionnable, et les cristaux blancs de proto-chlorure de cuivre noircissent à la lumière; ainsi, plusieurs composés de ce métal doivent être rangés parmi les matières altérables sous l'influence des rayons lumineux.

J'ai employé le moyen suivant pour obtenir du proto-chlorure de cuivre impressionnable, sur lequel j'ai pu étudier l'action du spectre, comme on le verra dans le chapitre suivant. Voici ce que j'extrais des notes du cahier d'expériences d'octobre 1847. « En exposant une plaque « de cuivre à la vapeur d'acide chlorhydrique, elle prend une légère « teinte, comme si on la couvrait d'un voile blanchâtre. Dans cet état, elle « est couverte de proto-chlorure de cuivre, et à la lumière elle passe ra- « pidement au noir.... ». Les plaques de cuivre exposées aux vapeurs de brome et d'iode changent également de couleur, et même j'ai observé qu'une lame de cuivre chauffée et couverte d'oxyde, lorsqu'elle devient jaunâtre, est assez sensible à la lumière; quand une lame ainsi oxydée est exposée à la vapeur d'acide chlorhydrique, elle devient même très-impressionnable.

MM. Garnier et Salmon (1) se sont occupés de l'action exercée par la lumière sur l'iodure de cuivre préparé par les plaques de cuivre et la vapeur d'iode. M. B. Renault (2) a obtenu des couches de chlorure, bromure, iodure et fluorure de cuivre impressionnables à la lumière en plongeant des lames de cuivre dans des liquides pouvant leur céder du chlore, du brome, de l'iode ou du fluor. D'après les différences de solubilité des sels insolés et non insolés, il a pu conserver des impressions faites sur ces surfaces sensibles.

Composés de mercure. — Les oxydes de mercure sont altérés par la lumière, le bioxyde comme le protoxyde; ils perdent probablement de l'oxygène. D'après Davy (3), l'oxyde de mercure obtenu par

(1) *Comptes rendus de l'Acad.* — *Bullet. de la Société de ph.*, t. 13, p. 97.
(2) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 10, p. 317 et 347.
(3) Davy, *Philosoph. chimique*, ouvrage déjà cité, t. 1, p. 335.

une solution de potasse et le calomel (protochlorure) exposé au spectre change de couleur, et devient rouge dans les rayons rouges en absorbant de l'oxygène ; les rayons violets, au contraire, décolorent l'oxyde rouge de mercure humide. La première réaction est due à la décomposition du protoxyde en bioxyde et en mercure, qui se fait avec la plus grande facilité et qui a lieu tout aussi bien à la chaleur de l'eau bouillante que sous l'influence de la lumière (1). L'expérience peut se faire aisément en plaçant le protoxyde dans un tube comme celui de la figure 44 page 48 et en l'exposant à la lumière; on voit alors que dans le vide comme dans l'air sa teinte noire devient plus claire et passe au jaune par places. Si l'on trempe une feuille de papier successivement dans des solutions de proto-azotate de mercure et de potasse, on forme un dépôt de protoxyde de mercure, qui se décolore un peu à la lumière, mais tout en restant grisâtre.

Quant à l'oxyde de mercure exposé sous l'eau à la lumière solaire, il prend à sa surface une teinte noire; il se dégage, à ce qu'il paraît, des bulles de gaz oxygène (2).

Le protochlorure de mercure s'altère aussi, quoique faiblement; quant au proto-iodure, il est rapidement impressionnable. Une feuille de papier lavée simplement avec une dissolution d'azotate de mercure donne aussi une coloration à la lumière et une réduction métallique.

On a cité la décomposition qui s'opère entre une dissolution d'oxalate d'ammoniaque et de bichlorure de mercure quand le mélange est exposé à la lumière; il y a formation de sel ammoniac, précipitation de protochlorure de mercure (calomel) et dégagement d'acide carbonique. M. Poitevin a reconnu que le mélange de ce même sel de mercure avec l'alloxantine donne au soleil du protochlorure de mercure avec dégagement de gaz (3).

Dans le cours d'expériences faites avec M. Fremy, nous avons observé que l'on avait une action très-nette et très-tranchée, sans dégagement de gaz, en mélangeant une dissolution d'acide oxalique avec une dissolution de bichlorure de mercure. A l'obscurité, ou sous l'influence de la chaleur, les deux liquides ne se troublent pas, et il n'y a pas réaction entre les corps; mais à la lumière solaire, comme à la lumière diffuse, le mélange se trouble aussitôt et un précipité blanc se forme. Ce précipité

(1) Berzelius, *Traité de chimie*, trad. franç., 2e édition, t. 2, p. 497.
(2) *Ibid.*, t. 3, p. 111.
(3) Poitevin, *Traité de l'impression photogr. sans sels d'argent*, p. 134.

est du protochlorure de mercure parfaitement pur. Les proportions qui ont le mieux réussi sont les suivantes : pour 100 gr. d'eau, 6 gr. 5 de bichlorure de mercure et 12 gr. 5 d'acide oxalique. Les deux nombres 6,5 et 12,5 sont sensiblement proportionnels aux équivalents des substances, et ces proportions permettent leur solution complète dans les 100 gr. d'eau à la température ordinaire. Dans le quatrième chapitre de ce livre il sera question de l'emploi de cette substance pour étudier l'intensité des rayons actifs.

Cette réaction indique que sous l'influence de la lumière le bichlorure de mercure est partiellement réduit; le protochlorure formé étant insoluble se précipite aussitôt. Quant à l'équivalent de chlore mis en liberté, il se porte sur un équivalent d'hydrogène de l'eau pour former de l'acide chlorhydrique, et l'oxygène correspondant en reagissant sur l'acide oxalique donne de l'acide carbonique, qui reste dans la liqueur et se dégage peu à peu.

Cette action de la lumière sur certaines combinaisons permet de concevoir comment M. Hunt (1) a obtenu des précipités différents en mélangeant à des solutions d'argent ou de mercure, insolées ou non insolées, des sels capables de produire des précipitations; dans le cas des dissolutions insolées, une partie des combinaisons ont dû passer à un état d'oxydation moindre. M. J. Herschell a également montré quelle était l'action de la lumière sur le proto-azotate de mercure isolé ou mélangé à différents sels (2).

Sels de fer. — Les sels de peroxyde de fer tendent à passer à l'état de sels de protoxyde et à perdre un équivalent d'oxygène quand ils sont soumis à l'action de la lumière; on peut citer le cyanoferrite, l'oxalate de peroxyde de fer, etc., surtout quand ils sont en présence de corps pouvant s'oxyder et leur enlever un de leurs éléments constituants. Lorsque ces corps sont isolés, ils sont décomposés, mais en faibles proportions, et les réactifs capables de déceler la présence des sels de protoxyde donnent alors des indications sur les effets produits.

Les dissolutions de perchlorure de fer dans l'alcool et l'éther se décolorent à la lumière (3); la dissolution alcoolique laisse précipiter de l'oxyde de fer, et le sel dissous passe à l'état de protocholure si

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 59, p. 373 (1845).
(2) *Philosophical trans.*, 2e partie (1842), p. 181.
(3) Berzelius, *Traité de chimie*, 2e édit. française, t. 3, p. 529.

l'action lumineuse est suffisamment prolongée (1). Lorsque ce sel mélangé avec des combinaisons organiques, comme l'acide oxalique ou l'acide tartrique, se trouve exposé aux rayons solaires, le passage du fer au minimum de chloruration est accompagné d'effets que l'on doit signaler :

Si l'on mélange une dissolution de perchlorure de fer avec une dissolution d'acide oxalique dans une éprouvette que l'on renverse sur un bain de même nature, à l'obscurité on n'obtient aucun effet; mais sous l'influence des rayons solaires il se produit aussitôt un dégagement abondant de gaz acide carbonique, dû à la décomposition de l'acide oxalique ; on peut comprendre la réaction en remarquant que l'on a dans le mélange $Cl^2 Fe + Ho + C^2O^3$, et qu'il vient $Cl Fe + Cl H + 2 Co^2$. Mais il est possible qu'avant l'action solaire il se produise du peroxalate de fer, par le fait du mélange et que l'action lumineuse se porte sur ce composé; car M. Draper (2), qui a observé cette réaction, conseille l'emploi d'une dissolution de ce dernier sel, donnant lieu sous l'action de la lumière solaire ou diffuse à un dégagement d'acide carbonique et à une précipitation d'un sous-sel ferrugineux. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet quand il sera question des réactions à l'aide desquelles on peut évaluer la quantité d'action chimique produite par une source lumineuse déterminée.

M. Draper a reconnu la difficulté d'estimer la quantité d'acide carbonique dégagée lors de la réaction de la lumière sur le peroxalate de fer, car une partie de ce gaz reste toujours dissous dans le liquide; il a remarqué que cette dissolution de peroxalate de fer mélangée à du chlorure d'or ne donne aucune précipitation, mais qu'aussitôt que l'action de la lumière a lieu l'or se précipite, par suite de la formation du sel de fer au minimum.

M. Poitevin (3) a observé la réaction curieuse qui a lieu entre le perchlorure de fer et l'acide tartrique : Si l'on fait une dissolution de 12 à 20 parties de perchlorure de fer dans 100 parties d'eau, et de 6 à 10 parties d'acide tartrique dans la même quantité de liquide, en mêlant les deux dissolutions, on a un liquide qui peut se conserver sans altération dans l'obscurité. Étendu sur une feuille de papier ou sur du verre

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 9, p. 145.

(2) *Philosoph. mag.*, sept. 1857. — *Biblioth. univ. de Genève*. — *Archives des sciences physiq.*, t. 36, p. 258 (1857).

(3) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 62, p. 192. — Poitevin, *Traité de l'impression photographique sans sels d'argent*, Paris (1862), page 173.

à l'abri de la lumière, il donne lieu, après l'évaporation, à une couche sèche. Mais si la lumière vient à frapper cette surface, auss tôt les parties qui ont été éclairées deviennent hygroscopiques, et sont aptes à retenir des poussières ou d'autres matières ténues : cet effet provient de la production du protochlorure de fer déliquescent. On verra plus tard que M. Poitevin a utilisé cette propriété pour le tirage des épreuves photographiques positives avec des matières pulvérulentes quelconques, charbon, sanguine, etc.; il a montré qu'en formant ces images sur papier, on peut en les plongeant dans des disssolutions métalliques qui sont réduites par les sels de fer au minimum, faire apparaître des images. Tel est l'effet des sels d'or qui sont réduits par le protochlorure de fer. L'acide gallique, qui forme de l'encre avec les sels de peroxyde, peut colorer la partie non insolée et laisser intacte la partie insolée; quant au cyanoferrite de potassium, ou cyanure rouge, il donne à la partie insolée une coloration bleue.

M. Chevreul (1) a reconnu que le cyanure de fer (bleu de Prusse) est décoloré dans le vide et devient blanc sous l'influence de la lumière, et qu'en présence de l'oxygène il reprend sa coloration. Mais ce phénomène ne se produit pas de telle sorte qu'il se reforme le même composé que celui qui a été altéré par la lumière; en effet, dans le vide le bleu de Prusse perd du cyanogène ou de l'acide cyanhydrique, et il ne reprend ensuite que de l'oxygène, en sorte qu'après des expositions multipliées et répétées à la lumière du soleil dans le vide et dans l'air, on réduirait probablement le bleu de Prusse à n'être plus que du peroxyde de fer, mais il faudrait pour cela beaucoup de temps.

M. J. Herschell (2) a montré que le ferrocyanure rouge de potassium, c'est-à-dire le cyanoferrite est impressionnable à la lumière; il y a formation d'un sel de protoxyde. Si on en imprègne un papier que l'on recouvre ensuite de perchlorure de fer et qu'on l'expose à la lumière, il se forme une teinte bleue, due à la production du cyanure de fer (bleu de Prusse). Cette réaction est facile à expliquer en raison de la réduction des deux sels. Mais il se produit ensuite un effet curieux : si l'action des rayons solaires est suffisamment intense, la trace bleue disparaît et le papier devient blanc, pour se colorer de nouveau en bleu à l'obscurité. Cet effet provient de ce que le cyanure bleu de fer se désoxyde à son tour par l'ac-

(1) *Recherches chimiques sur la teinture.* — *Mém. de l'Acad. des sciences,* t. 16 (1838), t. 19, p. 491 (1835), et t. 23, p. 1 (1853).
(2) *Philosoph. transanct.* (1842), 2e partie, p. 181.

tion de la lumière, puis de ce que le nouveau sel reprend sa coloration bleue à l'obscurité en reprenant de l'oxygène.

M. J. Herschell a reconnu également que les sels de fer tels que l'ammonio-citrate et l'ammonio-tartrate éprouvent à la lumière des actions du même genre que le cyanure, et que déposés sur des papiers ils peuvent donner plus ou moins rapidement des impressions colorées. Quand une feuille de papier enduite d'ammonio-citrate de fer est partiellement insolée, puis plongée dans une dissolution d'or ou d'argent, l'or ou l'argent se trouvent réduits sur les parties insolées et donnent des impressions d'une grande netteté. Si la feuille insolée est plongée dans une dissolution de cyano-ferrite de potassium, elle devient bleue par la réduction du sel comme précédemment avec le bichlorure de fer. Du reste, on peut varier beaucoup les effets de couleur obtenus à l'aide des papiers préparés au moyen des composés ferrugineux et d'après les principes précédents.

M. Draper (1) a observé que lorsqu'une feuille de papier, après avoir été placée sur une solution de bleu de Prusse dans l'oxalate d'ammoniaque, est exposée à l'action de la lumière sous un cliché photographique, on voit les portions qui en subissent l'influence acquérir une légère coloration bleue. Si la feuille est ensuite lavée avec de l'eau, puis immergée dans de l'acide chlorhydrique étendu, cette impression faible devient extrêmement intense. Une fois l'excès d'acide enlevé par des lavages et le papier desséché, l'image obtenue disparaît promptement sous l'action de la lumière, pour reparaître à l'obscurité.

Sels d'uranium. — Les sels d'uranium donnent des effets du même genre que les composés de mercure et de fer. L'azotate d'urane, qui est un azotate de peroxyde, passe à l'état de sel de protoxyde sous l'influence lumineuse, et peut donner lieu aux mêmes effets que les sels précédents. Ainsi l'azotate d'urane dissous dans l'alcool conserve sa couleur jaune à l'obscurité, mais laisse déposer du protoxyde d'urane vert sous l'influence des rayons solaires.

Une feuille de papier recouverte d'une couche de ce même sel, puis desséchée, exposée à la lumière, donne une impression faible; mais plongée alors dans une dissolution d'un sel d'or, d'argent ou dans du cyano-ferrite de potassium, elle indique par un dépôt d'or, d'argent, ou de cyanure de fer, la désoxydation opérée par la lumière.

Composés de chrome. — L'acide chromique réagit comme oxydant sur

(1) *Bulletin de la Société de photographie*, t. 7, p. 269.

un grand nombre de substances sous l'influence de la lumière, il cède une partie de son oxygène, et passe à un état d'oxydation moindre. Cet effet a été observé par M. Ponton (1), et j'ai indiqué quelques-unes des réactions que l'on peut obtenir avec cette matière (2). Cet acide dissous dans l'alcool puis soumis à l'action des rayons solaires donne lieu à une précipitation d'oxyde hydraté de chrome; en agissant sur l'amidon, le sucre, la gomme et d'autres matières organiques, il produit des effets analogues.

Habituellement, au lieu d'acide chromique, on emploie les bichromates de potasse ou d'ammoniaque, qui agissent par leur excès d'acide et passent à l'état de chromates neutres. Ainsi une feuille de papier enduite de bichromate de potasse, quand elle est sèche, se colore rapidement en brun à la lumière en vertu de la réaction indiquée plus haut.

C'est sur cette propriété de l'acide chromique agissant sur la gomme ou l'albumine que repose le procédé de lithophotographie découvert par M. Poitevin, et sur l'insolubilité communiquée à la gélatine par le même composé que M. Talbot a basé un procédé de gravure photographique dont il sera question dans le livre III de ce volume.

On pourrait encore citer beaucoup d'autres exemples de l'action chimique produite par la lumière, et on verrait qu'en général l'effet qui a lieu sur les sels métalliques est une réduction partielle ou totale avec ou sans l'influence de substances organiques. D'autres composés peuvent également subir une action analogue; ainsi des substances organiques, même hors de la présence de l'oxygène, peuvent être décomposées, comme on l'observe avec le curcuma, qui, d'après ce que l'on a vu page 58, peut se décolorer dans le vide à la lumière; l'acide azotique, sous l'influence des rayons solaires, se décompose en oxygène et en acide nitreux, et j'ai observé qu'une feuille de papier enduite d'une légère couche d'eau fortement acidulée par l'acide sulfurique se colore un peu à la lumière, ce qui tendrait à montrer qu'il se manifeste une réaction entre la matiere organique et une partie de l'oxygène de l'acide sulfurique. Mais les exemples précédents suffisent pour montrer quel est le mode d'action de l'agent lumineux et combien sont nombreuses les circonstances dans lesquelles on observe son influence (3).

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, nouv. série, t. 23, p. 414.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* t. 10, p. 469 (1840).

(3) On peut consulter à ce sujet un ouvrage de M. Landgrebe intitulé : *Ueber die chemischen und physiologischen Wirkungen der lichtes;* Marbourg, 1834.

§ 4. *Effets chimiques continués après l'influence lumineuse. Rayons continuateurs.*

Certains effets chimiques dus à l'action de la lumière une fois commencés peuvent être continués dans l'obscurité, soit sans aucune action extérieure, soit par l'emploi de certains réactifs ou par l'influence de la chaleur ou de la lumière.

Seebeck a observé que si l'on enduit un papier à l'aide d'une dissolution de chlorure d'or, une fois desséché il ne change pas de couleur à l'obscurité; mais si après une exposition assez courte aux rayons solaires, alors que la partie insolée ne montre qu'une coloration à peine sensible, on le rentre dans l'obscurité, la réduction de l'or a lieu et le papier passe par différentes phases qu'il aurait prises sous l'influence lumineuse. J'ai pu constater ce résultat en employant du chlorure d'or neutre, et M. J. Herschell, dans le mémoire cité plus haut, a observé des effets analogues avec diverses préparations de sels d'or. Parmi les sels métalliques impressionnables, ce sont du reste les composés d'or qui montrent peut-être le plus nettement les effets de ce genre.

On a des exemples d'autres effets chimiques qui une fois commencés se continuent d'eux-mêmes à l'obscurité; tels sont, d'après M. Regnault (1), les résultats de l'action du chlore sur l'éther chlorhydrique et sur l'alcool. Suivant M. Draper (2), l'eau chlorée exposée pendant quelque temps à la lumière, puis rentrée dans l'obscurité, continuerait à laisser dégager du gaz oxygène; mais il faudrait s'assurer que ce dernier gaz ne proviendrait pas de la réaction chimique opérée sous l'influence de la lumière et n'aurait pas éprouvé un simple retard de dégagement.

Les différentes méthodes photographiques sont fondées sur des effets très-remarquables, qui doivent se ranger dans la même classe de phénomènes : la réaction découverte par Daguerre, et qui forme la base de sa magnifique invention, consiste, en ce qu'une plaque d'argent recouverte d'iodure par son exposition à la vapeur d'iode, et exposée pendant un temps suffisant au foyer d'une chambre noire, n'offre pas l'image de celle-ci d'une manière appréciable, mais elle la possède à l'état latent; en effet, si la lame est exposée à la vapeur du mercure, l'image apparaît par suite de la fixation du mercure sur les parties frappées par

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 2ᵉ série, t. 71, p. 355 (1839).
(2) *Philos. mag.*, nov. 1845. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. 59, p. 365.

la lumière. La manière la plus simple d'expliquer ce phénomène consiste à admettre que dans les parties insolées, alors que l'effet n'est pas possible à distinguer par la vision, l'iodure est changé en sous-iodure, et que sous l'action du mercure il y a décomposition du sous-iodure en iodure et en argent métallique; l'argent s'amalgame avec le mercure et produit les blancs de l'image. Un lavage ultérieur dans l'hyposulfite de soude enlève tout l'iodure d'argent qui restait sur la lame.

Le temps nécessaire pour impressionner la lame d'argent iodurée est excessivement court, et sous l'action de la lumière solaire c'est par fractions de seconde qu'il faut compter pour ne pas dépasser ce temps; bien plus, quand la lame recouverte d'iodure est exposée pendant peu de temps à la vapeur de brome, on peut rendre la surface 60 fois plus sensible encore. Il n'y a pas de matière chimiquement impressionnable d'une sensibilité plus grande que la lame d'argent iodurée puis bromurée. D'après cette explication, des traces d'argent que l'œil ne peut distinguer suffisent pour déterminer la fixation du mercure dans les parties qui ont été insolées.

La lumière seule peut produire le même effet que la vapeur du mercure, et certains rayons qui n'auraient pas exercé d'action dans des conditions ordinaires peuvent continuer une action commencée par d'autres. J'ai été conduit à ces résultats curieux (1) en étudiant l'action du spectre solaire sur les matières impressionnables et en observant que l'iodure d'argent préparé sur les plaques métalliques, ainsi que le chlorure, l'iodure et le bromure de même métal obtenus sur papier avec excès d'azotate d'argent, substances qui ne sont sensibles que depuis le bleu jusqu'au delà du violet prismatique quand elles ont été préparées à l'obscurité, deviennent impressionnables depuis le bleu jusqu'au rouge quand elles ont reçu préalablement un commencement d'action, c'est-à-dire lorsqu'elles se trouvent dans des conditions telles qu'exposées à la vapeur de mercure, ou à l'influence des sels réducteurs, elles auraient fait apparaître une image. Au lieu d'opérer avec le spectre solaire, on peut employer des écrans de verre coloré; on observe alors qu'un verre jaune ou rouge tamise la lumière de façon à ce que les rayons transmis peuvent continuer l'action commencée sur les composés d'argent cités

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 11, p. 702 (1840). — *Mém. des savants étrangers*, t. 8, p. 373. — *Ann. de Chimie et de physique*, 3e série, t. 9, p. 257 (1843). — Voir aussi le rapport de M. Biot à l'Académie des sciences sur ce travail, *Comptes rendus de l'Academie*, t. 12, p. 101.

plus haut, mais ne peuvent la commencer eux-mêmes. De là la dénomination de *rayons continuateurs*, que j'avais donnée à ces rayons peu réfrangibles, et de *rayons excitateurs* appliquée aux rayons les plus réfrangibles; mais ces dénominations ne sont pas nécessaires, car il n'y a de différence entre eux que la réfrangibilité ou la longueur d'onde; ainsi au delà d'une certaine longueur d'onde des rayons incidents les effets chimiques sont commencés et continués; pour une longueur d'onde moindre, la continuation seule a lieu.

Cette continuation des phénomènes chimiques par l'action de la lumière est très-remarquable; elle est telle que sous les verres jaunes une image commencée sur une plaque daguerrienne, et qui est encore latente, vient d'elle-même sous l'action des rayons solaires qui ont traversé cet écran coloré, et la réduction de l'argent métallique dans les parties insolées donne du blanc comme l'aurait fait la vapeur du mercure, en sorte qu'à l'aide de la lumière seule on peut obtenir une image de la chambre noire. M. Gaudin, qui, sur mes indications (1), a employé les verres colorés à la reproduction des images daguerriennes en avait obtenu de forts bons résultats.

Peu de temps après la publication de ces récherches, M. Majocchi (2) a annoncé qu'au moyen de la chaleur il pouvait continuer des effets chimiques commencés sur des papiers de bromure d'argent sous l'action de la lumière. La chaleur produirait donc, dans certaines limites, des effets semblables à ceux que la lumière ainsi que certains réactifs chimiques peuvent manifester. On a dit que la chaleur pouvait donner lieu à la production d'images en plaçant en contact, dans l'obscurité, des papiers sensibles et des gravures dont on avait élevé la température (3); mais, dans cette circonstance, l'action réductrice des matières qui se trouvent en présence des sels métalliques, action qui est activée par l'élévation de température, semble pouvoir expliquer les effets observés.

Deux ans environ après la publication de la découverte de Daguerre, M. Talbot (4) fit connaître une réaction chimique conduisant au même résultat que l'action de la vapeur de mercure et celle des rayons les moins réfrangibles; elle forme la base des procédés photographiques sur papier aujourd'hui en usage. Voici en quoi elle consiste : lors-

(1) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 12, p. 862 et 1060.
(2) *Ann. de physique, chim. et math. de Florence*, sept. 1841.
(3) *Bulletin de la Société phot.*, tome 5, p. 177 (1859).
(4) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 12, p. 1055 (1841).

qu'une feuille de papier est recouverte d'un sel d'argent sensible à la lumière, comme l'iodure d'argent obtenu par double précipitation avec excès d'azotate (1), en la plaçant au foyer de la chambre noire elle ne donnerait une image qu'au bout d'un temps plus ou moins long. Mais si au bout de quelques instants on vient à la déplacer et à l'examiner dans l'obscurité en s'éclairant d'une lumière rouge ou jaune, on ne trouve aucune trace de l'image; en la plongeant alors dans une dissolution d'acide gallique et en échauffant le liquide, on voit peu à peu apparaître l'image, comme si le temps d'exposition à la chambre noire eût été beaucoup plus prolongé. Les parties insolées deviennent noires, c'est-à-dire qu'il se produit, comme on sait, une image négative.

On obtient le même résultat en substituant au papier une lame de verre recouverte de gélatine, d'albumine ou de collodion sur laquelle on a déposé soit une couche simple d'azotate d'argent, soit de chlorure, bromure ou iodure avec excès d'azotate; on peut alors plonger cette lame partiellement insolée dans une dissolution réductrice d'acide pyrogallique, de protosulfate de fer, de protochlorure d'étain, substances qui agissent dans le même sens que l'acide gallique, quoiqu'en donnant des teintes différentes à l'argent déposé sur les parties insolées de l'image.

Dans cette circonstance, le dépôt d'argent dans le bain réducteur ne paraît pas en rapport avec l'action chimique commencée sur le sel d'argent, et semble beaucoup plus considérable que celle qui correspondrait à la partie influencée de la surface impressionnable; et même, d'après les observations de M. Davanne (2), quand le bain réducteur renferme un sel soluble d'argent, d'azotate d'argent par exemple, la réduction de l'argent fait fixer sur les parties insolées beaucoup plus d'argent que la couche sensible n'en renfermait avant son impression. Dans une expérience, une lame de verre collodionnée qui ne renfermait que 25 milligr. d'argent à l'état d'iodure, en a donné 160 millig., c'est-à-dire 6 fois plus après son exposition à la lumière et son immersion dans l'acide gallique. Il semble donc que la surface impressionnée sur laquelle toute trace de décomposition chimique est inappréciable pour l'œil, contient cependant de très-faibles quantités d'ar-

(1) Voir pour l'influence de l'excès d'azotate ce qui a été dit plus haut page 63 et le livre III relatif à la photographie.

(2) *Bulletin de la Société photographique*, t. 3, p. 131.

gent, qui dans le bain réducteur fixent le métal provenant de la réduction du sel dissous. La surface impressionnée, ou du moins les faibles quantités de sous-sel d'argent qui s'y trouvent, joueraient donc un rôle analogue, par rapport au mélange du sel réducteur et de la dissolution d'argent, que les parcelles d'éponge de platine par rapport aux matières dont elles déterminent les combinaisons et les décompositions. On explique même ainsi comment une image photographique faible de ton peut être renforcée en la plongeant à différentes reprises dans des bains contenant des sels réducteurs mélangés de sels d'argent. On se borne, quant à présent, à ces indications, ce sujet devant être développé plus loin dans un des chapitres du livre III, relatif à la photographie.

Des effets du même genre peuvent se produire avec d'autres sels métalliques : ainsi, j'ai remarqué qu'une feuille de papier recouverte de chlorure d'or et partiellement impressionnée, étant plongée rapidement dans une solution étendue d'acide oxalique dont la température est de 40 où 50°, puis lavée dans l'eau, prend une coloration violette, due à la réduction de l'or dans les parties qui avaient commencé à se colorer sous l'influence de la lumière.

CHAPITRE II.

Effets produits par les rayons différemment réfrangibles.

§ 1. *Effets du spectre solaire sur les matières impressionnables.*

Les effets produits par la lumière sont si variés qu'il est nécessaire d'examiner comment chaque matière sensible se comporte sous l'influence des rayons différemment réfrangibles, et l'on va voir que si quelques principes généraux peuvent résulter de cet examen, cependant on peut dire que chaque substance est un instrument à l'aide duquel on doit interroger le rayonnement lumineux, et qu'il y a autant d'effets différents que de substances impressionnables.

En général les effets chimiques ont lieu dans les rayons les plus

réfrangibles du spectre solaire et même dans la partie ultra-violette, et l'on a pu voir tome Ier, page 31, ainsi que page 45 de ce volume quelles avaient été les premières observations de Schéele et de Ritter sur le chlorure d'argent; on a vu également tome Ier, livre IV, page 138 (1), que j'avais été conduit à observer, à l'aide des actions chimiques, les mêmes raies noires que celles du spectre visible, même au delà du violet; ainsi les différences observées proviennent seulement des matières inégalement impressionnables. Examinons quels sont les effets que présentent la plupart des matières qui ont été indiquées dans les chapitres précédents.

Afin d'agir avec des rayons lumineux d'une réfrangibilité bien définie, on fait réfléchir un faisceau de rayons solaires sur le miroir métallique d'un héliostat, et l'on introduit ce faisceau dans une chambre obscure par une fente verticale très-étroite dont on peut faire varier le diamètre depuis 0 mill. 1 jusqu'a 2 mill. : A la distance de 2 mètres environ de l'ouverture, sur le trajet des rayons, on place un prisme de flint glass très-blanc et très-pur, d'un angle de 60° et dans la position du minimum de déviation pour les rayons moyens; immédiatement derrière le prisme on fixe, perpendiculairement aux rayons réfractés, une lentille achromatique de 1 mètre de foyer, et l'on reçoit le spectre, sur un carton blanc à 2 mètres à peu près de la lentille. On a un spectre solaire bien étalé et dans lequel on distingue les raies noires. Quand on fait usage de substances très-impressionnables, il est nécessaire d'agir avec un spectre d'une certaine étendue, de 1 à 2 décim. de longueur entre les raies A et H par exemple; comme on peut faire varier la distance de la lentille et du prisme, et employer une lentille à plus court foyer, on peut augmenter ou diminuer la grandeur du spectre. Avec les matières très-peu impressionnables il faut se servir d'un spectre de 5 à 6 mill. de hauteur sur 30 à 35 mill. de longueur entre les raies A et H.

Je supposerai qu'on ait employé un prisme de flint glass très-blanc; avec le quartz, comme on l'a vu dans le Ier volume, page 140, on a un spectre un peu plus long pour la partie ultra-violette; mais la dispersion est moindre et la différence entre les effets observés avec les rayons les plus réfrangibles et ceux que présente un prisme de flint blanc sont assez faibles, eu égard aux indications générales qui vont être données, pour qu'il ne soit pas nécessaire d'en faire usage.

(1) *Biblioth. univ. de Genève*, t. 40, p. 341 (1842).

Lorsqu'on veut avoir un spectre bien épuré et éliminer autant que possible dans la chambre noire la plus grande partie de la lumière diffuse, qui viendrait influencer les matières sur lesquelles on opère, on doit avoir recours à une disposition représentée fig. 38, tome Ier, page 335 : on place en avant du volet de la chambre noire par où le faisceau de rayons pénètre une boîte en bois noircie de 50 à 60 centimètres de longueur, qui porte sur le prolongement de la route du faisceau lumineux une seconde ouverture longitudinale comme celle qui est faite au volet. De cette manière le faisceau pénètre dans la chambre par deux ouvertures longitudinales distantes de 60 centim., et les parois de la boîte arrêtent les rayons diffusés obliquement qui se seraient introduits par la première ouverture. Cette disposition n'élimine pas toute la lumière diffuse, car la lentille et le prisme en donnent encore quelques traces, mais à l'aide d'écrans percés d'ouvertures longitudinales, et que l'on place devant les substances impressionnables, on s'en affranchit en grande partie.

Afin de se guider dans les descriptions qui vont suivre et reconnaître les positions des parties actives de l'image prismatique, on place de nouveau ci-contre la planche fig. 13, où se trouvent les principales lignes non-seulement de la partie lumineuse du spectre solaire, mais encore de la portion ultra-violette, lignes qui ont été décrites tome Ier, page 138.

Phosphore. — La coloration rouge du phosphore a lieu rapidement à la lumière violette, comme on l'a vu page 47; mais les limites d'action dans l'image prismatique n'ont pas été indiquées d'une manière aussi précise qu'avec les substances dont on va parler ci-après. La disposition employée par M. Draper pour cette étude est assez simple (1) : elle consiste à couler le phosphore entre deux plaques de verre et à exposer cette lame mince à l'action de lumière; le sulfure de carbone et les dissolvants du phosphore blanc enlèvent ensuite la partie non impressionnée, et le phosphore rouge insoluble reste sur le verre. Il a pu obtenir ainsi des images photographiques de la partie la plus réfrangible du spectre avec ses raies.

Chlore et hydrogène. — La combinaison du chlore et de l'hydrogène a lieu sous l'influence des rayons les plus réfrangibles, et principalement des rayons violets et ultra-violets; elle ne se produit pas dans le rouge prismatique. Parmi les expérimentateurs qui se sont occupés de cette

(1) *Bulletin de la Sociét. photogr.*, t. 8, p. 17.

étude, on peut citer MM. Bérard (1), Draper (2), Fabre et Silbermann (3), Bunsen et Roscoe (4). D'après MM. Fabre et Silbermann, le maximum d'action aurait lieu entre les raies G et H du spectre solaire à un tiers environ de GH près de G, c'est-à-dire dans la partie que l'on appelait autrefois l'indigo du spectre; suivant MM. Bunsen et Roscoe, ce maximum serait plus près de H que de G, et même après H il y aurait un second maximum d'action, de sorte que la courbe des intensités qui, étant tracée le long du spectre, indiquerait la quantité d'action chimique produite dans un temps donné, après s'être élevée à l'endroit du maximum, s'abaisserait près de H pour se relever vers I et présenter comme un second maximum, moins fort que le premier.

L'action chimique, d'après ces derniers observateurs, nulle depuis le rouge extrême jusqu'en C, dans l'orangé, commence à être sensible dans le jaune en D; elle est encore faible dans le vert, et elle ne se fait sentir avec un peu plus de force que dans le bleu vers F, où elle est au moins six fois plus faible que dans la position du maximum. Elle est très-forte dans le bleu, le violet et jusque bien au delà du violet vers N, où elle recommence à décroître jusqu'aux limites les plus éloignées du spectre. Ces effets exigent que le spectre soit pur et que les divers rayons ne se mélangent pas, sans quoi les limites sont un peu différentes et les rapports des intensités peuvent changer.

Combinaisons d'argent. — L'action des différents rayons sur les combinaisons d'argent va permettre de reconnaître quels sont les divers effets produits suivant la nature des sels et leur état physique ainsi que selon la longueur d'onde des rayons actifs.

Examinons d'abord l'effet observé sur le chlorure d'argent; si ce composé est formé par double précipitation et est parfaitement lavé, en l'étendant dans un lieu bien obscur sur une surface inactive comme du verre, de la porcelaine et même à l'aide d'une couche de gomme arabique sur du carton, puis en projetant sur sa surface un spectre solaire bien épuré, on voit que la coloration commence en dehors du violet et au bout d'un certain temps s'étend d'un côté presque jusqu'au bleu et de l'autre dans la partie ultra-violette. Pour que l'effet soit facile à observer, il faut un spectre de petite dimension, car la matière est peu

(1) *Mém. de la Sociét. d'Arcueil*, t. 3.
(2) *Philos. Mag.*, juillet 1844. — *Biblioth. univ. de Genève*, t. 53.
(3) *Ann. de chim. et de phys.*, 3me série, t. 37, p. 297.
(4) *Ann. de Poggend.*, t. 108, p. 267 (1859).

impressionnable et on n'a pas une image aussi promptement qu'en faisant usage des préparations sur collodion ou des lames d'argent iodurées. La figure 45 représente, en même temps que la position des principales raies d'un spectre solaire avec un prisme de flint, l'étendue des parties actives sur différentes substances :

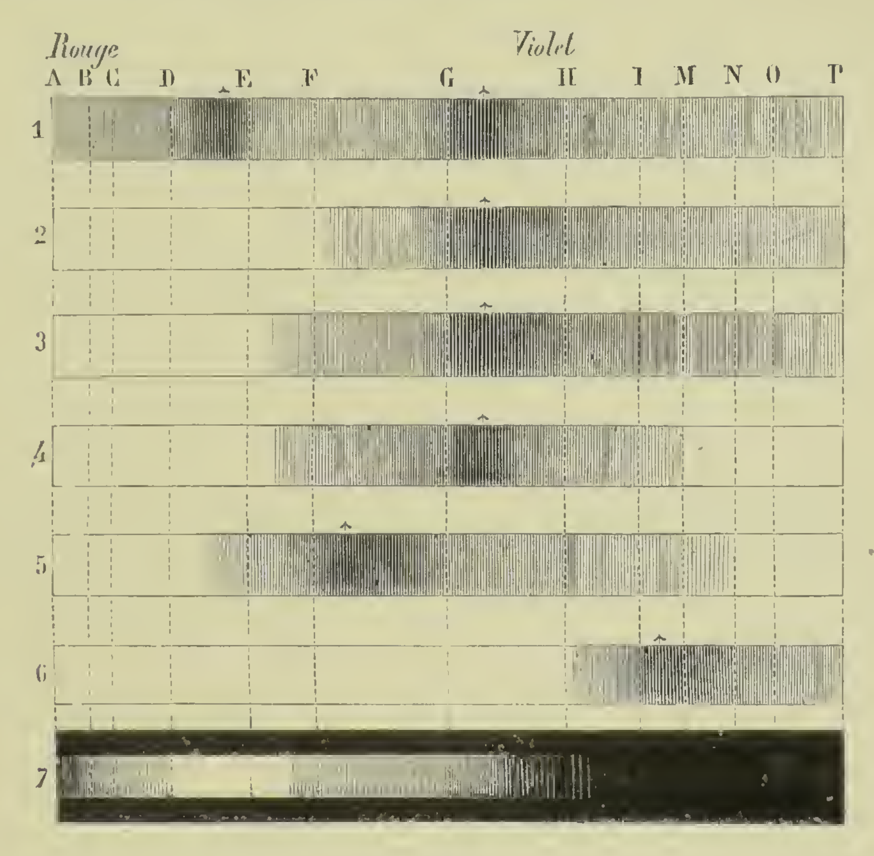


Fig. 45.

N° 1 plaque d'argent iodurée (couche jaune d'or), insolée pendant quelques instants.

N° 2 papier ou collodion enduit d'iodure ou de chlorure d'argent avec excès d'azotate d'argent, non insolé. Surface sèche.

N° 3 papier ou collodion enduit de bromure d'argent avec excès d'azotate d'argent, non insolé. Id.

N° 4 papier enduit de chlorure d'or neutre. Id.

N° 5 papier enduit de bichromate de potasse. Id.

N° 6 papier enduit d'une dissolution de gaïac dans l'alcool. Id.

N° 7 papier enduit d'une dissolution de gaïac, préalablement coloré en bleu par un lavage dans l'eau chlorée. Id.

Si la surface de chlorure d'argent a été primitivement colorée par la lumière, mais très-légèrement, et que l'on vienne à faire agir le spectre sur cette surface un peu insolée, on voit une image violette se former dans le violet et dans l'ultra violet, comme si l'insolation n'avait

pas eu lieu; mais en même temps une légère coloration rose apparaît à l'extrême rouge; vers le jaune le chlorure déjà coloré se décolore légèrement, puis il semble qu'une trace de bleu se fait sentir près de l'endroit où le chlorure se colore avec intensité. On verra dans le quatrième chapitre du livre suivant que ces effets dépendent de l'influence exercée par la lumière sur la petite quantité de sous-chlorure violet que l'insolation préalable avait formé sur le chlorure blanc.

Au lieu de préparer le chlorure d'argent comme on vient de le dire, on peut l'obtenir par double précipitation à la surface d'une feuille de papier, en déposant sur celle-ci une légère couche d'une dissolution de chlorure de sodium avec un pinceau ou en plongeant la feuille dans une dissolution aqueuse contenant 8 à 10 pour 100 de chlorure (eau 100, chlorure 8 ou 10); une fois la couche sèche, on plonge la feuille de papier dans une dissolution aqueuse d'azotate d'argent contenant 10 pour 100 d'azotate; alors le chlorure d'argent se trouve en présence d'un excès d'azotate (1), et il peut présenter les effets suivants :

Quand la surface a été préparée dans un endroit parfaitement obscur et qu'on l'expose dans le spectre solaire, au bout d'un temps qui dépend de l'intensité des rayons du spectre et par conséquent de la grandeur de l'image, on distingue une impression qui commence entre les raies G et H et ne s'étend que jusqu'en F dans le bleu, puis de l'autre va bien au delà du violet visible jusque vers P. Mais si le chlorure, après avoir été préparé dans une chambre parfaitement obscure, est exposé préalablement pendant un temps très-court à la lumière diffuse ou solaire, de manière à ce qu'il ne soit pas noirci, mais qu'un très-faible commencement d'action ait eu lieu, lorsqu'on vient ensuite à l'exposer dans le spectre solaire, on aperçoit non-seulement une coloration vers le violet extrême, mais on reconnaît qu'une action se manifeste en même temps dans la partie la moins réfrangible du spectre jusqu'au rouge, de sorte que l'espace noirci se trouve dans toute l'étendue du spectre lumineux et bien au delà du violet. Le n° 1 de la figure 45, et qui est relatif à une plaque d'argent ioduré, indique à peu près les limites des effets produits dans cette circonstance.

D'après le mode d'action de la lumière relativement à cette sub-

(1) Voir chapitre précédent, page 63. — *Comptes rendus*, t. 11, p. 702. — *Ann. de physique et de chimie*, 3e série, t. 9, page 257. — *Savants étrangers*, t. 8, p. 373. — Rapport de M. Biot à l'Académie des sciences sur ces phénomènes, *Comptes rendus*, t. 12, p. 101.

stance, et ainsi qu'on l'a vu dans le chapitre précédent, page 76, j'avais nommé les premiers rayons, les rayons violets, rayons excitateurs et les autres rayons rayons continuateurs; cela signifiait que, suivant la longueur d'onde des rayons ils se comportaient comme excitateurs par rapport à cette matière ou uniquement comme continuateurs. On pourrait aussi exprimer ce fait en disant que la substance, une fois qu'elle a reçu un commencement d'impression, est pour ainsi dire une autre substance impressionnable et se trouve impressionnée entre d'autres limites de réfrangibilité.

Si l'on exposait au spectre solaire le chlorure préparé, suivant la dernière méthode, dans une chambre parfaitement obscure et sans l'impressionner avant l'expérience, on ne verrait d'abord qu'une action dans les rayons les plus réfrangibles ; mais au bout d'un temps assez long on finirait par observer un effet dans les régions les moins réfrangibles. Cela tient uniquement à ce que le spectre, même le mieux épuré que l'on puisse avoir, est toujours accompagné d'un peu de lumière diffuse, qui finit par impressionner la surface quand la durée de l'exposition est suffisante. Ainsi, lorsque le chlorure a été primitivement impressionné, l'étendue de la partie colorée se trouve depuis le rouge jusque bien au delà du violet; mais il y a deux maxima d'intensité d'action, l'un entre G et H près de G, l'autre entre D et E vers le jaune, ce dernier correspondant à l'action continuatrice.

On voit, d'après les différentes expériences citées ci-dessus, et ainsi qu'on l'a dit dans le premier chapitre, page 63, que le chlorure d'argent mélangé à l'azotate est non-seulement plus impressionnable, mais devient sensible à l'action des rayons les moins réfrangibles dans des circonstances déterminées; la présence de l'azotate doit donc influer autrement qu'en présentant à chaque instant à la lumière une nouvelle quantité de chlorure non impressionné.

Le bromure d'argent se comporte comme le chlorure, et l'on obtient les mêmes effets, si ce n'est que l'action quand la surface n'a pas été préalablement impressionnée s'étend un peu plus loin du côté le moins réfrangible jusque dans le vert du spectre ; le n° 3 de la figure précédente indique cette extension. Mais quand ce composé est obtenu par double précipitation et bien lavé, et qu'il a été primitivement impressionné, il n'offre jamais les traces de couleur rouge vers le rouge et verdâtre dans le vert, comme le chlorure. Nous verrons en effet dans le quatrième chapitre du livre suivant que le sous-chlorure d'argent est

le seul corps jusqu'ici qui jouisse de la propriété de reproduire les couleurs du spectre.

Lorsque le bromure d'argent est préparé par double décomposition sur du papier, en appliquant d'abord sur la surface une couche d'une dissolution de bromure de potassium, puis en imprégnant cette surface quand elle est sèche avec de l'azotate d'argent, le bromure est formé en présence d'un excès d'azotate d'argent, et on observe des effets analogues à ceux que présente le chlorure dans de semblables conditions. Quand cette surface sensible n'a pas été insolée, en la plaçant dans le spectre solaire on a une impression qui commence entre les raies G et H, près de G, et s'étend peu à peu d'un côté au delà de F, de l'autre jusqu'à la limite extrême de l'ultra-violet; si la surface a été primitivement insolée, on reconnaît en outre un effet de continuation depuis le vert jusqu'au rouge, comme avec le chlorure.

L'iodure d'argent précipité et lavé n'est pas impressionnable, comme on l'a vu antérieurement, page 64; mais préparé par double décomposition sur une feuille de papier avec excès d'azotate, il se comporte comme le chlorure et le bromure. L'effet produit sur la surface non insolée ne s'étend pas aussi loin près du vert, et les limites d'action sont les mêmes que celles observées avec le chlorure (voir n° 2, fig. 45); lorsque la surface a été insolée, elle donne lieu à des effets de continuation jusqu'au rouge comme avec les deux autres composés.

Quand on prépare du collodion renfermant isolement soit du chlorure, du bromure, ou de l'iodure de potassium dans les proportions ordinaires et comme il sera dit livre IV, en traitant de la photographie, mais de façon à ce que chaque composé se trouve en présence d'un excès d'azotate d'argent, en exposant ensuite des lames de verre enduites de ces couches encore humides, et non impressionnées à l'avance, à l'influence du spectre solaire, puis en développant les images au moyen du sulfate de fer ou de l'acide pyrogallique, on obtient les résultats suivants :

Avec le collodion contenant du chlorure ou de l'iodure d'argent, les limites d'action sont à peu près les mêmes et les maxima paraissent occuper les mêmes positions; l'action commence à se manifester entre G et H, près de G, à un tiers à peu près de la distance GH, et l'image prismatique s'étend d'un côté entre G et F, à moitié distance de FG, et de l'autre jusqu'à la limite de l'ultra-violet en P, et même au delà. Avec le bromure d'argent, le maximum d'action est à peu près à la même

place, mais l'image se prolonge jusque dans le commencement du vert, c'est-à-dire jusque près de E.

On verra ci-après qu'avec les plaques d'argent iodurées puis exposées à la vapeur de brome, ou à l'action du chlore, on observe des images prismatiques de même étendue qu'en faisant usage des papiers sensitifs et des surfaces collodionnées : le chlorure et l'iodure d'argent sont impressionnables à peu près entre les mêmes limites de réfrangibilité, mais le bromure présente une extension plus grande du côté le moins réfrangible du spectre lumineux.

L'action de l'iodure de potassium sur l'argent métallique sous l'influence de la lumière donne lieu à la formation d'iodure d'argent, par la décomposition de l'iodure de potassium; ainsi un papier sensitif d'un sel d'argent préalablement coloré à la lumière, puis lavé, étant humecté d'une faible dissolution d'iodure de potassium, blanchit sous l'action des rayons lumineux; ce papier donne ce que l'on appelle des images positives. L'action du spectre solaire sur un papier préparé de cette manière, d'après M. J. Herschell (1), conduit aux résultats suivants :

Si le papier noirci a été recouvert d'une faible solution d'iodure de potassium, il blanchit dans la partie bleue du spectre; ainsi l'argent divisé, qui noircissait le papier, devient ioduré, et en présence d'un iodure alcalin ne se colore plus à la lumière. En même temps que l'on observe cette décoloration de la surface dans la partie la plus réfrangible, on voit le papier continuer à noircir dans le rouge et même au delà, et entre cet espace noirci et la partie qui s'est décolorée, il y a une ligne qui reste neutre. Si l'on couvre le papier noirci d'une nouvelle couche d'iodure de potassium, il commence à blanchir dans la partie la moins réfrangible, et la ligne neutre se rapproche du rouge; avec une solution d'iodure suffisante, le papier blanchit depuis le violet jusqu'au rouge. Enfin avec une très-forte solution d'iodure, le papier blanchirait même à l'obscurité, tant est active l'action de l'iodure de potassium sur l'argent métallique.

A l'aspect des images précédentes il semble qu'il y ait deux actions inverses de produites sur le papier préalablement coloré à la lumière : destruction de la couleur dans le violet, augmentation dans le rouge. Mais il faut remarquer que l'on n'observe que la résultante de plusieurs

(1) *Philosoph. transact.*, 1840, § 5, art. 94 ; *idem*, 1842, art. 214.

actions chimiques simultanées : 1° action de la lumière sur l'iodure d'argent qui a commencé à se colorer, action qui a lieu dans la partie rouge du spectre ; 2° décomposition de l'iodure de potassium dans la partie violette de l'image prismatique ; 3° ioduration de l'argent provenant du sous-iodure formé par la première réaction, c'est-à-dire tendance à la décoloration dans les rayons rouges. Suivant l'énergie de ces réactions, la ligne neutre se rapproche donc plus ou moins du rouge ou du bleu, et les étendues des impressions blanches et noires dans le spectre sont différentes. Ainsi ces apparences diverses tiennent à plusieurs réactions simultanées dont chacune peut devenir prédominante.

L'iodure d'argent formé à la surface d'une lame d'argent est très-propre à mettre en évidence les deux actions excitatrices et continuatrices indiquées plus haut, page 84, en même temps qu'il manifeste d'autres effets très-curieux observés également avec des papiers impressionnables.

Pour distinguer ces divers effets, il faut opérer avec une lame d'argent exposée simplement à la vapeur d'iode, et de façon à avoir la teinte jaune d'or. Si la lame a été iodée dans l'obscurité, en projetant sur sa surface et pendant un temps suffisant l'image d'un spectre parfaitement épuré, puis en exposant la lame à la vapeur de mercure, on a une impression, comme on l'a dit plus haut à propos des papiers et des verres collodionnés, dont le maximum est situé entre G et H, près de G, à peu près à un tiers de la distance GH; cette impression s'étend entre G et F en s'arrêtant brusquement avant cette ligne F, et va de l'autre côté jusque vers P. Quand la durée de l'action lumineuse n'a pas été trop grande, l'image est blanche par rapport au fond de la plaque et les raies noires se dessinent en noir sur le fond plus clair de l'impression prismatique (1). Lorsque la durée de l'action du spectre est plus grande, après l'exposition de la lame à la vapeur de mercure l'épreuve est dite solarisée dans les points où l'action lumineuse a été très-forte; dans ce cas, le mercure ne produit pas la teinte blanche primitive, et en s'étendant sur la plaque donne une couleur brune, due à son aspect miroitant. Mais dans l'une ou l'autre circonstance l'action a lieu entre les mêmes limites du spectre.

Lorsque la lame iodurée, avant d'être exposée au spectre, a été légèrement impressionnée à la lumière diffuse pendant une ou deux secondes au

(1) Ed. Becquerel, *Biblioth. univ. de Genève*, t. 40, p. 141. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 9, p. 265.

plus, ou bien pendant une fraction de seconde à la lumière solaire, alors l'action du spectre donne lieu à une impression depuis A jusqu'en P, mais de façon à ce que les images des parties frappées depuis le rouge jusqu'au bleu, et depuis le bleu jusqu'au delà du violet sont distinctes l'une de l'autre. D'abord l'image qui a son maximum entre G et H et va d'un côté entre G et F et de l'autre en P occupe la même place que sur la lame non insolée; mais ensuite une seconde image commence près de B, a son maximum en D, et s'étend jusqu'après F, là où la première image finit; cette seconde image est due à l'action continuatrice qui s'est exercée sur l'iodure d'argent insolé. Cet effet de continuation est aussi marqué qu'avec les papiers sensitifs décrits plus haut. On verra dans le chapitre suivant comment au moyen des courants électriques on peut déterminer l'intensité comparative des effets produits sur l'iodure d'argent dans les différentes parties du spectre solaire.

On peut, en opérant sur une surface ayant des parties insolées et d'autres non insolées, montrer très-clairement cette double action : on prépare la plaque iodurée dans une obscurité profonde, et à l'aide d'une planche en bois on couvre la moitié de la plaque, puis on expose la partie découverte à l'influence du rayonnement lumineux pendant un temps très-court. La plaque rentrée dans l'obscurité est mi-partie insolée, mi-partie non insolée, et la ligne de séparation des deux parties se trouve être une ligne droite correspondante au bord de l'écran qui a recouvert la surface. On expose alors la plaque au spectre solaire, en ayant soin que la ligne de séparation précédente soit parallèle à la longueur du spectre et la coupe en deux parties égales, et le spectre peut agir simultanément, moitié en longueur sur une surface insolée, et moitié en longueur sur une surface non insolée.

La figure 46 page suivante représente cet effet. La ligne LL indique la ligne de séparation des deux parties de la plaque : la partie supérieure a été primitivement insolée ; la partie inférieure est restée dans une obscurité complète avant l'action du spectre. Au bout de plusieurs minutes de l'influence lumineuse et après l'exposition de la plaque à la vapeur de mercure et le lavage à l'hyposulfite de soude, on reconnait que l'image du spectre sur la partie inférieure non insolée est limitée, d'une part entre G et F et de l'autre à l'extrémité de l'ultra-violet, comme on l'a dit plus haut, tandis que sur la partie supérieure, primitivement un peu insolée, il y a une seconde action, allant depuis une certaine limite com-

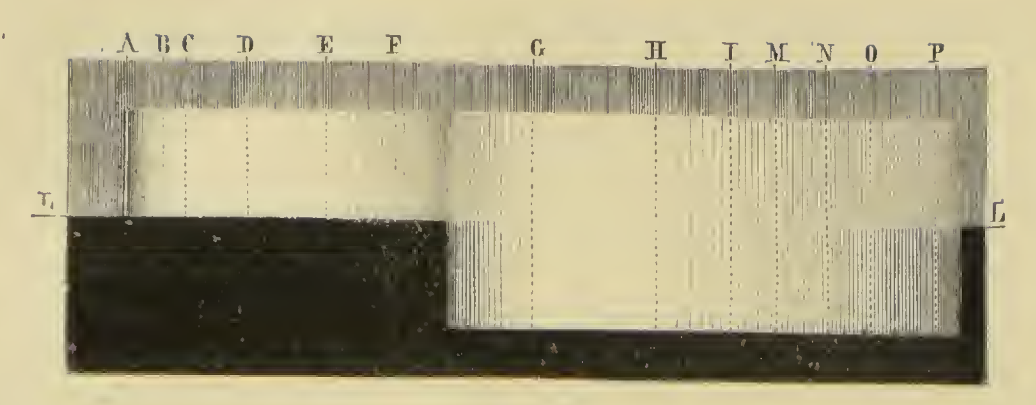


Fig. 46.

prise entre F et G jusque vers B dans le rouge. Sur les deux parties de la plaque, dans le violet et dans l'ultra-violet, les images ne peuvent être distinguées et la ligne de démarcation n'est pas sensible; mais dans le rouge le jaune et le vert elle est très-manifeste, car il n'y a impression que d'un seul côté, du côté supérieur qui est le côté insolé. Depuis B jusqu'en A et au delà, on distingue une place où la vapeur de mercure ne s'est pas déposée et où il semble que la lumière ait détruit l'effet produit par l'insolation; aussi la double raie noire A est-elle représentée en blanc, tandis que les parties voisines sont plus foncées, ce qui est l'inverse des autres raies depuis B jusqu'en H et au delà, car ces raies sont plus sombres que l'image prismatique. Quand le spectre est intense et l'action lumineuse prolongée, cet espace occupe une étendue un peu plus grande que la figure 46 ne l'indique, et sa limite va jusque vers B; mais on va revenir plus loin sur cet effet.

Si la plaque d'argent iodurée a été exposée à l'action du chlore pendant peu de temps, ce qui la rend plus sensible, comme on le verra livre III, les effets sont les mêmes ainsi que les limites d'action; ainsi on observe les mêmes effets de continuation entre le bleu et le rouge qu'avec l'iodure d'argent isolé; seulement, dans les épreuves que j'ai obtenues il semble que l'action contraire produite vers l'extrême rouge soit moins apparente.

Mais lorsque la plaque d'argent iodurée a été préalablement exposée à l'émanation du brome, préparation qui donne à la surface son maximum de sensibilité, les effets de continuation ne sont plus manifestes et les impressions formées par le spectre solaire sont les mêmes sur les plaques insolées et non insolées. La limite vers P, à l'extrême ultra-violet est la même qu'avec l'iodure et le chlorure d'argent; mais du côté le moins réfrangible l'extension est bien plus grande, car si l'exposition

au spectre est un peu longue, on observe une image presque jusqu'en B. On a donc, pour ainsi dire, une impression dans presque tout le spectre visible, le maximum d'effet se trouvant entre G et H près de G. Cette différence essentielle entre les effets présentés par la plaque iodée et bromée et les plaques iodées ou iodées et chlorées est à noter, car avec les papiers sensibles les effets de continuation sont manifestes avec les trois espèces de combinaisons d'argent, tandis qu'avec les plaques ils ne s'observent pas quand on se sert de brome. D'un autre côté, l'extension de l'image du côté du rouge est la même avec les collodions, les papiers, et les plaques iodées et chlorées, tandis que la plaque bromée donne une extension jusque vers B, le papier et le collodion de bromure d'argent ne donnant une image que jusqu'à une certaine distance de D entre F et D.

On se rend également compte, d'après cela, comment les opérateurs qui ont voulu appliquer les verres rouges et jaunes pour continuer les images de la chambre noire ont obtenu de bons résultats avec les plaques iodées et chlorées, tandis qu'ils n'ont rien eu avec les plaques bromées, puisque les effets de continuation ne peuvent être observés avec cette préparation. On explique aussi pour quel motif, quand on se servait de plaques iodées pour reproduire les images de la chambre noire, les tons verts et jaunes donnaient des impressions quand les surfaces sensibles contenaient du brome, tandis qu'ils n'en donnaient pas avec l'argent iodé et chloré.

Quand le spectre agit sur une plaque d'argent iodée puis bromée, préalablement impressionnée, après le passage de la lame à la vapeur de mercure et son lavage à l'hyposulfite de soude, depuis B jusqu'en A, et même au delà de A jusqu'à une distance à peu près égale à celle de A à C, on voit une place où la vapeur de mercure ne se fixe pas et ou la raie A se distingue en blanc sur le fond noir des parties voisines; il se produit là une action analogue à celle qui vient d'être signalée sur l'iodure, et sur laquelle on va revenir, action indiquant que les rayons rouges extrêmes ont détruit l'action préalable de la lumière diffuse. Si la lame, sans avoir été insolée à l'avance, est exposée pendant très-longtemps à l'action du spectre, la lumière diffuse qui accompagne toujours l'image prismatique impressionne assez la surface pour que l'effet précédent soit encore manifeste.

M. J. Herschell (1) remarqua, en 1839, l'action que les rayons rouges

(1) *Associat. britann.*, 1839. — *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 23, p. 185.

extrêmes exercent sur les papiers sensitifs préparés au moyen des sels d'argent, et d'après laquelle ces rayons empêchent la lumière diffuse de les faire noircir. M. Draper (1) en impressionnant une plaque d'argent iodurée avec un spectre solaire intense et non épuré observa que l'image prismatique offrait des apparences diverses, et crut que des rayons protecteurs empêchaient l'action chimique de se produire vers les extrémités du spectre. M. J. Herschell (2) attribua les différentes nuances observées dans cette circonstance à des épaisseurs inégales de couches minces déposées à la surface des lames d'argent servant de surfaces réfléchissantes; quant à l'influence des rayons extrêmes rouges, il ne leur attribua pas un effet manifestement négatif par rapport aux rayons violets, comme M. Draper l'avait fait; il pensa même que dans le cas des papiers sensitifs l'élévation de température dans les rayons rouges pouvait, en desséchant le papier, le rendre moins sensible. Mais l'action de la chaleur ne doit pas être invoquée ici, et s'il y a protection de la lame ou opposition au dépôt de la vapeur de mercure, il faut que cet effet tienne à des réactions chimiques complexes ou à une action spéciale des rayons les moins réfrangibles.

MM. Foucault et Fizeau (3) en impressionnant au spectre une plaque d'argent iodée et bromée observèrent des effets du même genre, et remarquèrent que depuis la raie C jusque de l'autre côté du rouge, et ainsi qu'on l'a dit plus haut, la vapeur mercurielle ne se condensait pas; ils pensèrent que l'effet produit par les rayons rouges devait être considéré comme contraire à celui que l'on observait sous l'influence des rayons bleus et violets.

Mais doit-on admettre des rayons négatifs, agissant en sens contraire des rayons les plus réfrangibles? L'action positive indiquant la formation d'un sous-iodure, c'est-à-dire un départ d'iode, l'action contraire serait une ioduration du sous-iodure. Si l'iode est séparé de la combinaison, comment sera-t-il restitué au sous-sel formé? Se produirait-il une oxydation comme avec le cyanure de fer blanc?

A l'époque de la publication de ce travail je fis quelques observations sur ce sujet (4), en faisant remarquer que plusieurs réactions chimiques pourraient peut-être avoir lieu, et qu'il se produirait alors

(1) *Philosoph. Mag.*, nov. 1842.
(2) *Philosoph. Mag.*, série 3, vol. 22, fév. 1843.
(3) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 23, page 679, 1846.
(4) Id., t. 23, p. 800.

un effet analogue à celui qui se manifeste quand du papier noirci et recouvert d'iodure de potassium blanchit par l'action de l'une des extrémités du spectre et noircit sous l'influence de l'autre, comme on l'a vu plus haut; car la surface d'argent recouverte d'iode, puis de brome, et préalablement insolée, est une couche formée par un mélange d'iodure et de bromure d'argent déjà altéré, avec de l'iodure et du bromure non altéré. Les observations faites depuis par M. Claudet (1) à l'aide de verres colorés sont venues également montrer comment avec l'iodure simple d'argent l'épaisseur de la couche complique le phénomène, puisqu'avec une couche mince d'iodure sans mélange d'autres substances (couche jaune d'or) les verres jaunes et rouges donnent lieu au phénomène de continuation que j'ai trouvé, tandis qu'avec une couche plus épaisse d'iodure et plus sensible la surface impressionnée voit son insolation détruite par la lumière qui traverse ces verres, de sorte que ceux-ci détruisent l'effet de la lumière diffuse, comme ils le font avec la couche iodée et bromée. Bien plus, une couche épaisse d'iodure non mélangé impressionnée par les rayons violets, puis exposée sous les verres rouges et jaunes, revient à l'état normal.

Si l'on rapproche ces résultats des effets électriques que j'ai observés avec des couches minces ou épaisses d'iodure d'argent, et comme on le verra plus loin, effets électriques qui sont inverses dans les deux cas, et qui montrent que la couche mince sous l'influence de la lumière indique une séparation d'iode, et la couche épaisse une réaction chimique ultérieure de l'iode sur la lame d'argent, on voit que les couches d'iodure plus ou moins mélangées de brome et d'épaisseurs diverses constituent des surfaces impressionnables dans lesquelles plusieurs réactions peuvent se produire simultanément ou successivement, et où il est difficile de discerner le résultat final.

La figure 46, représentée plus haut, indique près de A et sur une faible largeur l'effet dont il est question ici. Mais, comme on l'a déjà fait remarquer précédemment, suivant la préparation de la couche ainsi que selon l'intensité de l'insolation primitive et la durée de l'impression lumineuse, l'étendue de l'espace où se produit ce phénomène est plus ou moins grande, et peut aller depuis la raie C jusqu'au delà de A.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Id., t. 25, p. 938. — *Ann. de chim. et de phys.*, 3e série, t. 22, p. 248.

En résumé, en considérant comme complexes les couches impressionnables formées par les composés d'argent déposés sur des papiers, des verres collodionnés et des plaques de plaqué d'argent, et en s'en tenant aux effets qui résultent des expériences faites dans les conditions indiquées ci-dessus, on reconnaît dans l'action du rayonnement sur ces substances les trois effets suivants :

1° Effet produit dans le spectre solaire depuis le bleu jusqu'au delà du violet sur tous les papiers, verres collodionnés ou lames d'argent recouvertes d'iodure de chlorure ou de bromure de ce métal, et dans le cas de la lame d'argent bromée, effet pouvant aller, du côté le moins réfrangible, jusqu'a l'orangé ; les limites d'action ont été indiquées plus haut.

2° Effet de continuation sur les papiers et les surfaces enduites d'iodure de chlorure ou de bromure avec excès d'azotate d'argent ainsi que sur les plaques iodées et iodées puis chlorées, depuis la raie B dans le rouge jusque près du bleu, lorsque ces surfaces ont été préalablement impressionnées. Sur les plaques d'argent iodées et bromées on n'observe aucun effet de ce genre ainsi que sur le chlorure et le bromure d'argent précipités isolément et lavés.

3° Effet des rayons rouges extrêmes et infra-rouges pour rendre les surfaces d'argent iodées et iodées bromées, préalablement insolées, incapables de condenser la vapeur de mercure et les placer dans des conditions semblables à celles où elles étaient avant l'insolation. Cet effet est analogue à celui que l'on observe lorsque ces mêmes rayons rouges extrêmes retardent ou s'opposent à la coloration des papiers sensitifs d'argent à la lumière diffuse.

Composés d'or. — Une feuille de papier enduite de chlorure d'or s'impressionne dans le spectre solaire au bout d'un temps assez long depuis E jusqu'au delà de H vers I, c'est-à-dire depuis le vert jusqu'au delà du violet. Cette impression est lente, attendu que ce sel est très-peu sensible, mais on peut en mettant à profit la propriété dont jouissent les papiers recouverts de sels d'or de continuer à se colorer à l'obscurité quand ils ont été préalablement impressionnés à la lumière, et dont il a été question page 75, obtenir une image suffisamment colorée pour distinguer les parties actives du spectre ; il suffit, après avoir reçu sur la surface du papier un spectre très-intense, d'enfermer ce papier dans une boîte pendant quelques heures pour trouver toute l'étendue correspondant à l'espace EI du spectre colorée en

jaune foncé, le maximum d'action étant entre G et H. Le n° 4 de la figure 45, page 83, représente l'image dont il est question.

Acide chromique. — On a vu antérieurement, page 73, qu'en présence des matières organiques, l'acide chromique cédait une partie de son oxygène et passait à l'état d'oxyde hydraté de chrome. Pour avoir aisément une surface impressionnable où cette réaction se produise, il suffit de tremper une feuille de papier dans une dissolution concentrée de bichromate de potasse, et de la laisser sécher dans l'obscurité; exposée à la lumière, elle change rapidement de couleur et passe du jaune à la couleur bois foncé. Dans le spectre, comme on le voit n° 5 (fig. 45), la coloration est à son maximum au commencement du bleu près de la raie F, et un peu plus du côté du violet que cette ligne. L'action paraît s'arrêter brusquement à l'extrémité du vert, au delà des lignes *b* et E; du côté le plus réfrangible du spectre, elle va en s'affaiblissant graduellement, et en M la coloration est presque insensible.

Si le spectre présente les raies noires principales, en prolongeant l'influence lumineuse on voit toujours les raies marquées faiblement en jaune et ayant la teinte du papier non impressionné. Un lavage à l'eau fait disparaître le bichromate non attaqué, et l'impression demeure fixée. Si l'on plonge alors le papier dans une solution alcoolique d'iode étendue, comme je l'ai montré (1), les espaces clairs deviennent bleus par suite de la réaction de l'iode sur l'amidon qui est à la surface du papier, et les raies deviennent plus visibles.

Composés de plomb. — On a vu précédemment, page 54, que le protoxyde jaune de plomb était impressionnable dans les rayons les plus réfrangibles, mais que cette première coloration une fois donnée à la substance, sous les verres jaunes et rouges elle devenait plus claire. Je n'ai pas répété ces expériences avec le spectre solaire, et je n'ai pu savoir si cette décoloration était le résultat d'un effet inverse du premier, c'est-à-dire s'il se produisait dans ce cas une désoxydation de la matière.

Combinaisons de mercure. — Les composés de mercure, ainsi que la plupart des sels métalliques d'argent, sont sensibles dans la partie violette de l'image prismatique; ayant placé dans plusieurs petits tubes le mélange d'acide oxalique et de bichlorure de mercure qui donne un précipité blanc de protochlorure de mercure à la lumière, comme on l'a

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 10, p. 469.

vu antérieurement, page 69, et ayant exposé ces tubes dans les différentes parties d'un spectre solaire très-intense pendant deux heures, j'ai observé une précipitation dans le violet et l'ultra-violet et nullement dans les autres parties colorées du spectre. Ainsi cette matière m'a paru impressionnée à peu près entre les mêmes limites de réfrangibilité que le chlorure d'argent précipité.

Combinaisons de cuivre. — On a vu page 68 quelle était l'action exercée par la lumière diffuse sur plusieurs composés de cuivre; j'ai montré également que le protochlorure formé à la surface d'une lame de cuivre en exposant celle-ci à la vapeur de l'acide chlorhydrique, était rapidement impressionnée par la lumière. Le bromure de cuivre, en couche très-mince, obtenu par l'exposition de lames de cuivre à la vapeur de brome, ou mieux de l'eau bromée, est également fort impressionnable; quant à l'iodure de cuivre, préparé dans des conditions analogues il est moins sensible que les deux substances précédentes. Il était intéressant d'examiner comment ces divers composés se comportent sous l'influence des différents rayons du spectre solaire pour obtenir rapidement une impression lumineuse. Il faut faire usage d'un spectre très-court et très-intense; la longueur de celui que j'ai employé était de 5 à 6 centimètres sur 1 centimètre de largeur.

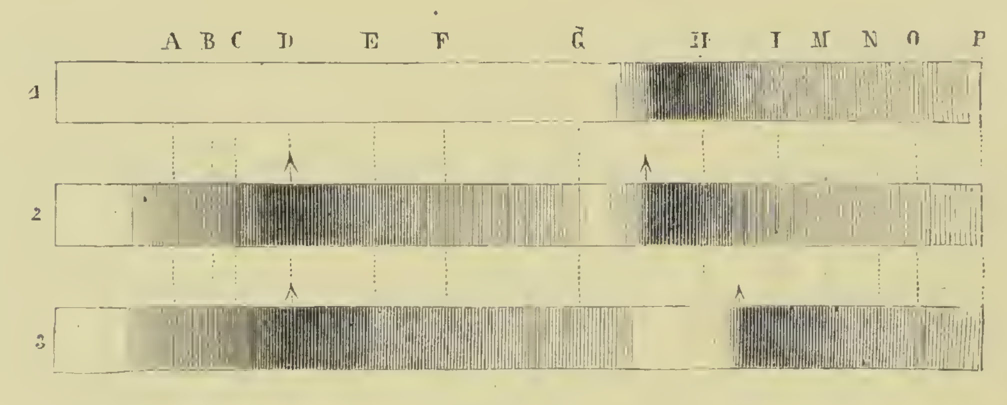


Fig. 47.

N° 1 iodure de cuivre.

N° 2 bromure de cuivre.

N° 3 chlorure de cuivre.

La figure 47 représente l'effet obtenu sur les trois corps dont il vient d'être question. L'iodure de cuivre, n° 1, manifeste une action depuis un intervalle compris entre G et H jusque vers P; je n'ai pas distin-

gué d'effet dans les rayons les moins réfrangibles pendant la durée de l'expérience.

Le bromure de cuivre, fig. 47, n° 2, a offert deux espaces impressionnés, séparés par une partie voisine de G où la plaque de cuivre est restée presque intacte : le premier, compris dans la partie la plus lumineuse du spectre, a son maximum en D, et occupe l'étendue G A en se prolongeant bien au delà de A ; le deuxième correspond à la région active du spectre sur l'iodure de cuivre, a son maximum entre G et H, décroît brusquement vers G, et s'étend jusque près de P, dans l'ultra-violet. On doit remarquer que la réaction chimique exercée par la lumière sur le bromure de cuivre est une de celles qui présentent la plus grande extension dans les rayons infra-rouges.

Le chlorure de cuivre, fig. 47, n° 3, comme le bromure, donne deux espaces impressionnés séparés par une région inactive. Le premier s'étend du rouge au violet; le maximum d'action a lieu près de D, et la teinte de l'image va en se dégradant vers les deux extrémités, en se prolongeant dans la partie infra-rouge; ainsi ses limites d'action suivent à peu près celles des rayons qui excitent la rétine, et le maximum d'effet a lieu près des points où se trouve le maximum de lumière. Le deuxième prend brusquement vers I, et va en se dégradant jusqu'en O; il est moins long que le premier, mais entre I et M l'action est presque aussi vive que vers D. La région du spectre située entre H et I est donc presque inactive sur le protochlorure de cuivre; les deux images, séparées par une partie où se trouve un minimum d'action prismatique, rappellent les images phosphorescentes décrites dans le premier volume et obtenues par l'action du spectre solaire sur les sulfures de calcium et de strontium.

La comparaison des images 2 et 3 de la figure 47 montre que dans la partie la moins réfrangible du spectre le bromure ainsi que le chlorure de cuivre sont sensibles entre les mêmes limites de réfrangibilité, tandis que dans les rayons les plus réfrangibles le chlorure a son maximum situé plus loin que le bromure.

En exposant au spectre une lame de cuivre recouverte de chlorure de ce métal, dont une moitié avait été préalablement impressionnée comme dans l'expérience faite avec l'iodure d'argent et citée page 89, j'ai reconnu que le deuxième espace impressionné, c'est-à-dire le plus réfrangible, était de même nuance sur les deux moitiés de la surface, tandis qu'il m'a semblé que la région rouge, jaune et verte avait donné une coloration un peu plus intense sur la portion impressionnée que sur celle

qui ne l'était pas; mais la différence n'a pas été assez grande pour que l'on puisse tirer aucune conclusion de cette observation.

Matières organiques. — Si les surfaces sensibles préparées avec les sels métalliques présentent des effets très-variés quand elles sont soumises à l'action des différents rayons du spectre solaire, les matières organiques offrent des différences plus grandes encore; il suffira de citer plusieurs exemples pour le prouver.

On a vu antérieurement, page 56, quelles étaient les observations de Wollaston sur la résine de gaïac, qui se colorait en bleu verdâtre par l'action des rayons violets et se décolorait ensuite dans la partie la moins réfrangible du spectre. La figure 45, reproduite ici, n[os] 6 et 7,

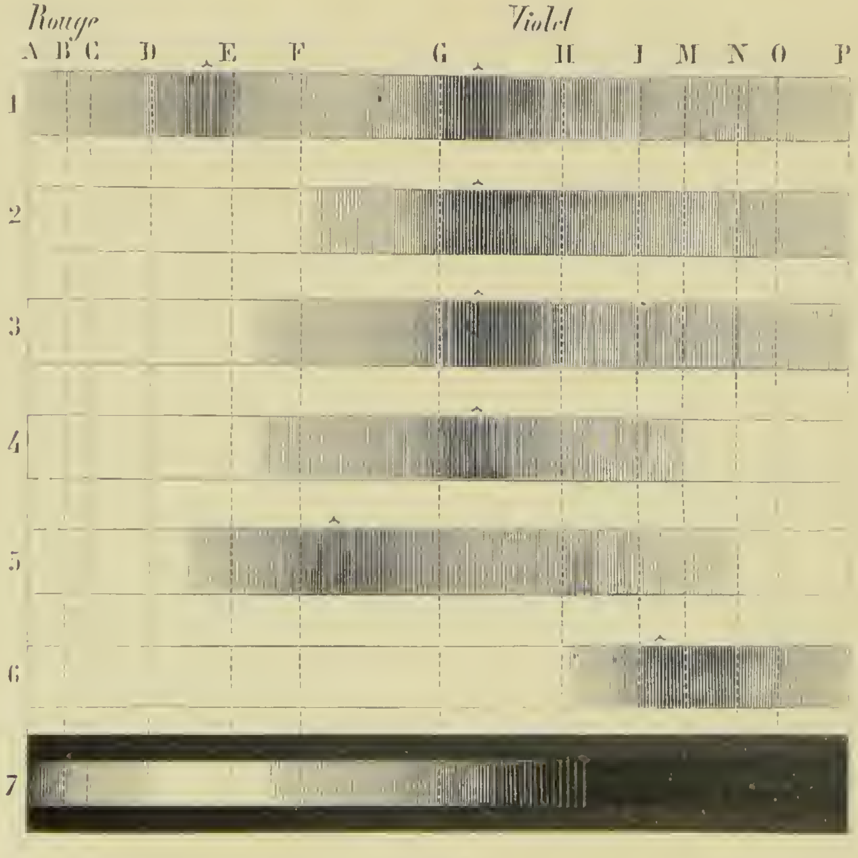


Fig. 45.

indique les deux effets que j'ai obtenus dans les conditions suivantes. Ayant préparé une solution alcoolique de gaïac après avoir traité préalablement cette résine dans de l'eau chaude, à plusieurs reprises, j'en ai recouvert une feuille de papier qui a été exposée à l'action d'un petit spectre concentré pendant trois heures; la coloration bleue s'est manifestée au delà des rayons violets, entre H et P, fig. n° 6; le maximum s'est trouvé près de M.

Une partie de la même feuille de papier a été alors colorée en bleu en la traitant par une solution aqueuse de chlore, qui produit l'oxydation de la résine, et cette surface a été exposée à l'action du même spectre. J'ai trouvé au bout de plusieurs heures un espace décoloré s'étendant du rouge au violet et représenté n° 7, le maximum d'action paraissant être près de F. On a déjà parlé dans le chapitre précédent, page 56, de cette double action de la lumière sur le gaïac, mais il n'est pas encore démontré que cet effet soit le résultat d'une désoxydation de la matière bleue.

M. J. Herschell (1), dans un travail déjà cité antérieurement, a étudié l'action du spectre sur des feuilles de papier recouvertes de cette résine. Il a reconnu qu'en faisant usage d'une dissolution alcoolique de gaïac, si l'action prismatique a lieu dans une chambre noire où aucune lumière diffuse ne pénètre, il se produit une belle couleur bleue dans les rayons violets et au delà, comme on l'a dit plus haut. Mais si on laisse en même temps arriver de la lumière diffuse sur la feuille de papier, alors le fond général du papier tourne au vert brun, excepté dans la partie où tombent les rayons les moins réfrangibles; de A en F, dans cette région, la teinte blanche est conservée, et il semble que la lumière protége le papier contre l'action de la lumière diffuse. Il peut se faire que les deux actions indiquées plus haut, coloration et destruction de la coloration, aient lieu en même temps et conduisent à l'effet observé.

Quant à l'impression depuis le bleu jusqu'au delà du violet, elle consiste en une première partie bleue commençant au bleu du spectre, c'est-à-dire vers la raie F, ayant son maximum à l'extrême violet et diminuant d'intensité au delà, de façon à atteindre un minimum; puis on observe un second maximum, beaucoup plus foncé que le premier, et qui correspond sans doute à l'effet observé quand la lumière diffuse ne pénètre pas dans la chambre. Ainsi la décoloration de la matière, ou l'effet en apparence inverse de celui qui produit la coloration, a lieu seulement depuis le rouge jusqu'au vert. Mais il faut remarquer que la lumière diffuse venant à agir depuis le vert jusqu'au violet, il est possible que dans ces régions l'effet de cette lumière l'emporte sur l'action décolorante des rayons dispersés par le prisme, et que l'on n'observe une déco-

(1) *Philosoph. transact.*, 2e p. (1842). — *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 44, p. 164.

loration que là où l'action de la lumière diffuse est plus faible. Il est donc probable que, suivant l'intensité de la lumière diffuse par rapport à celle du spectre, la ligne de séparation entre la partie blanche de l'impression prismatique et la partie bleue, au lieu d'être en F, est plus près du rouge ou plus près du violet ; ce dernier cas correspondrait à l'intensité la plus faible de la lumière diffuse.

Si le papier imprégné de résine de gaïac a été bleui par le chlore, on observe l'effet indiqué plus haut, c'est-à-dire une décoloration depuis le rouge jusqu'au violet. Il se produit un effet analogue quand on prépare une solution de gaïac dans de l'eau rendue alcaline par la soude, et que l'on colore également avec le chlore la surface du papier qui en est recouverte.

En étudiant l'action du spectre solaire sur du papier enduit de différentes teintures de sucs de fleurs dissous dans l'alcool, M. J. Herschell a reconnu que les diverses couleurs végétales qui sont influencées par les rayons solaires sont détruites dans des portions différentes du spectre solaire. En général, les rayons actifs ne sont compris qu'entre le rouge et le violet; l'action est positive, c'est-à-dire que la lumière détruit la couleur, soit en totalité, soit en laissant une teinte affaiblie sur laquelle les rayons solaires n'exercent plus d'action, et opère, pour ainsi dire, une analyse chromatique dans laquelle deux couleurs sont séparées, l'une étant enlevée, détruite, l'autre laissée pour résidu. Cette destruction de couleur, comme on l'a vu précédemment, page 57, est ordinairement due à une oxydation de la matière par les rayons lumineux.

Dans quelques circonstances l'action de la lumière ne se montre pas immédiatement, mais alors des réactifs chimiques peuvent faire apparaître une image, ces réactifs agissant différemment sur les substances avant l'action de la lumière ou après qu'elles ont été impressionnées. M. J. Herschell a même observé qu'avec un papier recouvert d'une matière colorante jaune, le *corchorus japonica*, les impressions peuvent augmenter d'intensité dans l'obscurité comme les impressions sur les sels d'or. Sous l'action du spectre cette couleur jaune est détruite en quinze ou vingt minutes par les rayons verts, bleus et violets. Si l'action se prolonge, le papier blanchit, quoique plus faiblement, dans le rouge et au delà du violet, et l'image présente trois maxima d'intensité et deux minima; ces deux derniers correspondent au jaune et au violet extrême. Mais vingt-cinq jours après, temps pendant lequel l'image

avait été conservée à une lumière faible, deux taches blanches distinctes apparaissaient aux deux extrémités du spectre, et les trois maxima étaient plus marqués. Cette extension des effets au-delà du rouge prismatique, comme avec les iodures d'argent et de cuivre, est à signaler.

M. J. Herschell a remarqué que les rayons les plus efficaces pour la destruction d'une couleur végétale quelconque sont, dans un grand nombre de cas, ceux qui par leur couleur sont complémentaires de la couleur de la matière végétale détruite. C'est ainsi que les matières végétales d'une couleur jaune ou orangée sont détruites avec plus d'énergie par la partie bleue du spectre; les couleurs bleues par les rayons rouges, orangés et jaunes, et les matières pourpres et roses par les rayons jaunes et verts; il n'y a qu'un petit nombre d'exceptions.

Il est possible que le phénomène d'absorption de lumière puisse rendre compte de ces résultats : en effet, quand une substance est colorée en jaune, par exemple, elle absorbe les rayons autres que ceux-ci, c'est-à-dire les rayons bleus et violets, et ces rayons étant absorbés avec plus de facilité, on doit concevoir que ce sont ceux qui doivent altérer la matière, et non pas ceux qui n'éprouvent pas les mêmes effets. Si ce principe s'étendait aux autres corps impressionnables, on voit que les composés blancs devraient être impressionnés surtout par les rayons ultra-violets; c'est peut-être pour ce motif que le chlorure d'argent ainsi que le mélange de bi-chlorure de mercure et d'acide oxalique, matières incolores, sont sensibles surtout à l'influence des rayons compris dans cette partie du spectre.

On a vu dans le chapitre précédent, page 59, que les huiles grasses exposées à l'air absorbent de l'oxygène ; elles s'épaississent alors et se durcissent de plus en plus selon leur nature, et, indépendamment des différentes circonstances qui influent sur le phénomène, la lumière ainsi que la chaleur sont les causes qui exercent l'action la plus grande. M. Cloëz (1), en étudiant l'influence des rayons qui ont traversé différents écrans en verre coloré sur un certain nombre d'huiles, a constaté que cette influence était plus grande avec les rayons les plus réfrangibles, violets et bleus, qu'avec les rayons jaunes et rouges.

On voit, d'après les nombreux exemples qui ont été cités dans ce paragraphe ; que pour chaque matière chimiquement impressionnable à la

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* t. 61, p. 321 et 981 (1865).

lumière l'action des rayons solaires est différente, c'est-à-dire que ces substances ne sont pas impressionnées entre les mêmes limites de rayonnement et que les positions des maxima et des minima d'action ne sont pas les mêmes. Ainsi, chaque substance est un appareil particulier, qui est sensible d'une manière particulière et à l'aide duquel on doit interroger le mode d'action de l'agent lumineux.

On a pu voir que l'étendue active du spectre sur les composés très-impressionnables est en général plus grande que celle du spectre lumineux, à moins que l'on ne considère comme agissant sur la rétine les rayons ultra-violets (*voir* tome 1[er], livre IV, page 141). On avait avancé que l'extrémité violette du spectre produisait des décompositions et l'extrémité rouge des combinaisons; mais on a des exemples d'effets contraires produits dans chaque partie du spectre : ainsi la combinaison du chlore et de l'hydrogène, l'oxydation du gaïac ont lieu à l'extrémité violette comme la décomposition des sels d'argent; d'un autre côté, la décomposition des sels de chrome, des sels de cuivre a lieu dans le jaune et le vert comme la décoloration des matières organiques. On peut conclure seulement de l'ensemble des faits observés que les rayons violets et ultra-violets sont en général plus efficaces pour agir sur les composés métalliques, et les rayons les moins réfrangibles pour produire l'oxydation des couleurs végétales.

On a supposé que l'on avait opéré avec des prismes en flint très-blanc; avec d'autres prismes bien purs, en quartz ou en spath fluor, on aurait les mêmes résultats. Cette question, au reste, sera étudiée dans le paragraphe suivant.

§ 2. *Action des écrans incolores et colorés. Prismes divers.*

Écrans incolores. — L'action des substances liquides ou solides sur les rayons actifs de diverse réfrangibilité permet d'expliquer différents effets, et entre autres l'inégale transmission, par les écrans incolores, des rayons lumineux et de la partie active du rayonnement sur diverses substances impressionnables. On va voir, d'après les résultats qui vont être cités ci-après, que cet effet tient à l'action exercée par ces écrans sur une partie du rayonnement, la partie ultra-violette, qui n'influence pas sensiblement la rétine.

M. Malaguti (1) a cherché à comparer les effets produits par les écrans transparents sur les rayons qui impressionnent les sels d'argent,

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 2[e] série, t. 72, p. 5 1839.

en mesurant le temps que des bandes de papier impressionnable mettent à se colorer de la même nuance quand elles sont placées sous ces écrans. Mais j'ai montré (1) que ce procédé était sujet à plusieurs causes d'erreur : d'un côté, la réflexion inégale des rayons sur les faces terminales des écrans, principalement quand ces écrans renferment des liquides, peut diminuer l'intensité lumineuse du faisceau de rayons incidents; d'un autre côté, certaines parties du rayonnement peuvent agir en sens inverse sur la matière sensible, comme avec le gaïac, ou bien les rayons, suivant leur réfrangibilité, peuvent exercer une action dont l'énergie dépend de l'impressionnabilité de la matière, et alors l'action ne se produit pas proportionnellement au temps (comme avec le chlorure d'argent, *voir* page 84). L'accélération ou le retard de la coloration d'une même surface ne donne donc que l'effet total, et ne peut servir à indiquer l'action des écrans sur les diverses parties actives du rayonnement lumineux.

Il n'en est pas de même si l'on examine l'action des substances transparentes sur les rayons du spectre solaire, en comparant à chaque instant les effets produits dans chaque région du spectre avec ceux que donne la même partie de l'image prismatique, mais cette dernière étant obtenue sans l'intervention de l'écran transparent. J'ai fait pour cette étude usage de la disposition suivante : un écran métallique percé de deux petites ouvertures circulaires de 5 millim. de diamètre, très-voisines, et dont les centres sont sur une même verticale, est fixé en avant d'un prisme en flint blanc; devant une des ouvertures est placé l'écran solide ou l'écran creux rempli de liquide sur lequel on opère, tandis que l'autre ouverture reçoit une petite lame de verre ou reste libre.

Si l'on place ce système dans une chambre obscure dans laquelle on introduit un faisceau de rayons solaires à l'aide d'une ouverture verticale d'un petit diamètre, à une distance de 1 ou 2 mètres de cette ouverture, mais de manière que les rayons tombent normalement sur l'écran, on aura derrière le prisme deux faisceaux de rayons qui ne différeront que parce que l'un n'aura traversé que l'air, et que l'autre aura traversé en plus le liquide employé.

On peut alors recevoir les deux spectres à quelque distance sur une surface impressionnable, et on aura deux spectres horizontaux, dont les parties de même réfrangibilité seront situées sur une même verticale. On

(1) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 9, p. 280 (1842).

peut donc, en faisant agir ces deux spectres simultanément sur un même papier sensible ou sur une même matière chimiquement impressionnable, reconnaître si dans celui qui est formé par les rayons qui ont traversé le liquide ou le solide se trouvent ou ne se trouvent pas tous les rayons contenus dans l'autre.

Afin de bien préciser la position des spectres, on place en outre derrière le prisme une lentille achromatique de 1 mètre de foyer environ, et l'on met le prisme dans la position du minimum de déviation pour les rayons moyens. Alors les rayons se croisent, et au-delà du foyer de la lentille on a les deux spectres avec toutes leurs raies comme il a été dit précédemment, de sorte qu'il est facile de préciser la position des diverses parties actives de ces deux spectres.

On a d'abord fait usage d'un prisme de flint; nous verrons plus loin qu'avec différents prismes ces effets sont à peu près les mêmes. On s'est servi comme substance impressionnable d'iodure d'argent préparé sur papier avec excès d'azotate d'argent, ou de lames de plaqué d'argent recouvertes d'iodure.

D'après ce procédé d'expérimentation, le spectre formé par les rayons qui ont traversé l'écran aurait un peu moins d'intensité d'action que l'autre, en supposant même que l'écran n'ait aucun pouvoir absorbant sur les rayons solaires, car une partie des rayons du faisceau incident se réfléchit sur les parois de l'écran. Pour mettre les deux spectres dans le même état relatif d'intensité, on place sur la route du second faisceau un écran en flint qui par la réflexion sur ses deux faces fait perdre à ce faisceau une partie de son intensité, et donne à peu près la même énergie d'action aux deux spectres.

Lorsqu'on emploie comme écran un des liquides suivants placés dans une petite cuve formée par des lames de verre très-mince, savoir :

L'eau,
Le chlorure d'étain liquide,
L'essence d'anis,
L'essence de copahu,
L'alcool,
L'acide sulfurique,
L'acide valérianique,
L'acétate d'oxyde d'amyle,

on ne voit aucune différence bien distincte dans les deux spectres.

Si l'action dure de dix à quinze minutes, on observe une impression entre les lignes noires F et P. Lorsque cette action a plus de durée, deux heures par exemple, il se produit alors une impression entre F et A, les rayons les moins réfrangibles agissant par continuation.

Avec les liquides incolores dont les noms suivent :

Eupione,
Aldehyde,
Iodure d'amyle,

on distingue une légère différence dans les deux spectres. Celui formé par les rayons qui ont traversé seulement l'air et le flint donne sur la surface sensible une impression qui s'étend de F en P, tandis que l'action exercée par l'autre ne s'étend que jusqu'en O ; de sorte que ces liquides absorbent en petite quantité les rayons extrêmes les plus réfrangibles. Quant aux rayons les moins réfrangibles, ils ne sont pas absorbés, et après un long espace de temps on peut avoir avec chaque spectre une impression de F en A.

En introduisant dans l'écran les substances suivantes :

Essence de térébenthine, Huile de naphte,

on reconnaît que les rayons extrêmes du côté de P sont également absorbés et que l'action absorbante s'étend vers N. Quant aux rayons les moins réfrangibles, on trouve toujours que leur action est la même dans les deux spectres et qu'elle s'exerce de F en A.

En employant un écran contenant les liquides désignés ci-après :

Essence de citron, Acide azotique,
Hydrocarbure de brome, Acide chlorhydrique,

on voit toujours dans le spectre des rayons qui ont traversé l'air et le verre une impression qui s'étend jusqu'en P, tandis que dans l'autre spectre l'action chimique s'arrête vers M ou entre M et N. Le pouvoir absorbant de ces liquides s'exerce donc sur les rayons extrêmes depuis M jusqu'en P.

Avec le chlorure de carbone liquide, l'essence d'élémi, le sulfure de carbone, les rayons qui sont au-delà de M sont arrêtés et ne donnent plus d'effets sur les surfaces sensibles.

En faisant usage des liquides suivants :

Créosote, Essence d'amandes amères,

l'impression dans le spectre s'arrête brusquement après H, de sorte que ces deux liquides absorbent tous les rayons plus réfrangibles que

la raie I. La partie du rayonnement comprise entre H et A traverse ces liquides comme elle traverse l'air, sans altération.

Quand on fait usage de la dissolution de sulfate acide de quinine, qui jouit de propriétés phosphorescentes, comme on l'a vu dans la première partie de cet ouvrage, on reconnaît que l'action chimique dans le spectre des rayons qui ont traversé ce liquide s'arrête brusquement en H, de sorte que le pouvoir absorbant de cette substance s'exerce sur tous les rayons qui influencent l'iodure d'argent de H en P. Pour les rayons situés de H en A, dans toute la partie visible du spectre, ils n'éprouvent aucune action de la part de cette solution. Du reste, toutes les matières très-fortement phosphorescentes, comme l'azotate d'urane, le verre d'urane, le bisulfate de quinine, absorbent la partie ultra-violette de l'image prismatique et donnent lieu au même effet.

Ainsi avec les différents liquides incolores cités plus haut, on arrive à ce résultat remarquable que la partie du rayonnement comprise de A en H dans la partie visible du spectre n'est pas absorbée, tandis que celle qui est en dehors du violet visible de H en P est plus ou moins absorbée suivant les substances, les rayons les plus réfrangibles étant les éléments les plus absorbables.

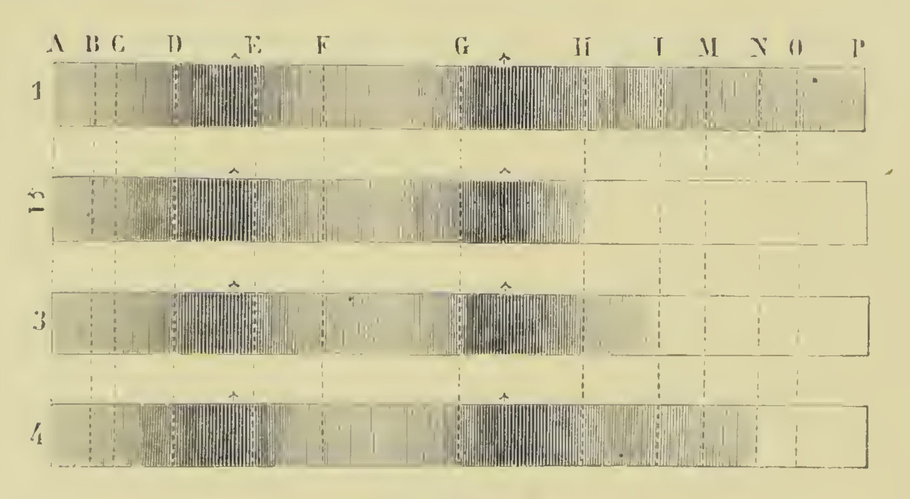


Fig. 48.

La figure 48, nos 1, 2, 3, 4, réunit les étendues des spectres qui représentent l'action produite lors de l'interposition de plusieurs écrans incolores. On voit que la partie ultra-violette est seule plus ou moins absorbée. Le n° 1 représente l'étendue du spectre agissant sur l'iodure d'argent impressionné, quand aucun écran liquide n'exerce son action sur les rayons qui traversent le prisme; le n° 2 représente l'effet produit par la créosote, l'essence d'amandes amères et le sulfate acide de

quinine; le n° 3 celui qui résulte de l'emploi du sulfure et du chlorure de carbone; le n° 4 l'étendue de l'impression quand on fait usage de l'essence de citron, de l'acide azotique ou de l'acide chlorhydrique.

Avec les écrans solides on observe les mêmes phénomènes : les uns arrêtent certains rayons situés au delà de H, entre H et P, d'autres laissent passer ces rayons en totalité. Ainsi l'interposition d'une lame de spath fluor ou de mica très-mince ne donne lieu à aucune action bien manifeste. Avec des lames de nitre ou baryte sulfatée, taillées en écran de 1 ou 2 millimètres d'épaisseur et à faces parallèles, on voit que les rayons extrêmes situés vers O sont en partie absorbés. Avec des écrans de verre à vitre, de plomb carbonaté, de diopside, on reconnaît que les rayons situés au delà de M sont absorbés de telle sorte que ce spectre n'a qu'une étendue limitée d'un côté en A et de l'autre entre M et N, comme dans le n° 4 de la figure 48. Enfin, en faisant usage d'un écran en dichroïte bien transparente, de 1 millimètre d'épaisseur, on voit que tous les rayons situés depuis I jusqu'en P sont absorbés complétement, de telle sorte que le spectre chimique n'a qu'une étendue AI, la limite extrême la plus réfrangible étant située vers I, entre H et I à peu près, comme le représente le n° 3 de la figure ci-dessus.

Dans toutes les expériences faites avec ces écrans solides, on n'observe, comme avec les liquides cités plus haut, aucune action inégale de la part de ces substances sur les rayons les moins réfrangibles situés de A en H entre les limites extrêmes des rayons visibles; es écrans peuvent bien agir par absorption sur ces rayons, mais ils agissent avec la même intensité sur toute l'étendue du spectre visible AH, de sorte que les rayons lumineux passant toujours en même proportion, les écrans ne cessent pas d'être incolores.

Une remarque que l'on doit mentionner ici, c'est que bien que l'étendue des espaces dans lesquels l'iodure d'argent est impressionné soit différente, puisque toute la partie IP peut manquer, cependant le maximum d'action reste sensiblement à la même place, entre H et G.

On a supposé que l'on avait agi avec l'iodure d'argent comme corps sensible, mais il est facile d'étendre ces résultats aux autres substances chimiquement impressionnables. Si l'on considère d'abord le chlorure ou le bromure d'argent sur lesquels le spectre solaire agit sur une étendue presque aussi grande que sur l'iodure, excepté vers l'extrémité P, en substituant à l'iodure un de ces composés, on trouve les mêmes résultats avec les écrans transparents; seulement, le temps

nécessaire pour colorer ces substances est plus long que pour l'iodure.

Si l'on fait usage du papier enduit de bichromate de potasse, sur lequel l'action du spectre s'étend de E en I, comme on l'a vu page 83, fig. 45, le maximum étant vers F, l'action chimique a lieu presque en entier dans la partie visible du spectre AH, à l'exception des rayons extrêmes, vers I. En faisant tomber, comme précédemment, les deux spectres sur cette surface, et en ayant soin que l'un des deux spectres soit formé par un faisceau de rayons qui a traversé la créosote ou le sulfate acide de quinine, on ne voit pas une grande différence entre les deux impressions produites, si ce n'est vers l'extrémité I, parce que pour cette substance impressionnable la partie du spectre solaire IMP inactive est celle qui se trouve principalement arrêtée par ces deux écrans.

Le gaïac, au contraire, qui bleuit dans la partie HP du spectre, doit rester incolore sous un écran de créosote ou de sulfate acide de quinine; et même, lorsqu'il a été coloré en bleu sous l'influence de la lumière, placé sous cet écran il est décoloré, car il n'est alors sensible qu'à l'action des rayons compris depuis A jusqu'en H, lesquels opèrent cette décoloration.

L'expérience peut être aisément faite de la manière suivante : On recouvre une feuille de papier de résine de gaïac en la trempant dans une solution alcoolique de cette résine, puis on la sépare en deux; on en met une moitié dans une capsule de porcelaine pleine d'eau et l'autre dans une capsule semblable contenant une solution de sulfate acide de quinine. Si on les expose toutes les deux à la lumière diffuse, la feuille de papier qui est dans l'eau pure ne tarde pas à verdir, puis à bleuir, tandis que l'autre reste incolore. Une fois que la première feuille est bleue on la met dans la seconde capsule, et on laisse cette dernière exposée à la lumière; alors cette feuille de papier ne tarde pas à redevenir blanche jaunâtre, comme précédemment.

La grande réfrangibilité des parties actives du spectre qui colorent en bleu cette substance est cause des différences considérables auxquelles on est conduit quand elle est influencée par la lumière au travers des écrans transparents; tandis qu'avec la substance précédente, l'acide chromique, les écrans transparents agissent peu différemment, puisque la partie active est principalement située entre H et A.

En résumé, on voit que toutes les substances sensibles n'étant pas impressionnées entre les mêmes limites de réfrangibilité, l'action des

écrans doit être très-différente sur les rayons qui les influencent. Ainsi, toutes celles qui ne sont pas impressionnées par des rayons d'une réfrangibilité plus grande que H s'impressionnent à peu près également sous tous les écrans transparents, quels qu'ils soient; je dis à peu près, car on ne connaît pas pour chacune d'elles la perte due à la réflexion de la lumière; tandis que les substances qui sont sensibles à l'action de rayons d'une réfrangibilité plus grande que H s'impressionnent inégalement sous les écrans transparents, puisque ces derniers rayons peuvent être absorbés par les écrans transparents et incolores.

Pour dire *a priori* quelle sera l'action d'un écran transparent sur une substance chimique donnée, il faut simplement chercher entre quelles limites de réfrangibilité cette substance est impressionnable, et ensuite quelle est la portion de la partie ultra-violette qui est absorbée par cet écran.

On peut se rendre compte par une comparaison bien simple de quelle manière un seul rayonnement peut donner lieu à des impressions d'étendue différentes dans le spectre : quand on reçoit le spectre lumineux sur une feuille de papier blanc, on voit toutes les couleurs prismatiques; mais si cette feuille de papier est colorée successivement de différentes teintes, en bleu, en vert, en jaune, en rouge, on ne distingue généralement de lumineuse sur cette feuille de papier que la partie bleue quand elle est teinte en bleu, la partie rouge si elle est teinte en rouge, etc....., de sorte que le spectre lumineux n'a pas la même étendue dans ces différents cas.

Lorsqu'on reçoit maintenant le spectre solaire sur les différentes matières chimiquement impressionnables, on peut concevoir qu'elles ont une espèce de coloration par rapport aux rayons solaires, et que les seuls rayons qui nous sont rendus sensibles sont ceux qu'elles absorbent dans les régions où elles se colorent. Seulement, dans ce cas-ci les rayons dont nous examinons l'action sont des rayons absorbés, tandis que dans le cas précédent les seuls rayons rendus visibles étaient ceux qui étaient réfléchis irrégulièrement par les molécules de matière colorée répandue sur l'écran blanc. Mais pour la lumière nous avons la couleur pour juger de la différence des rayons qui impressionnent la rétine, tandis que nous n'avons pas de qualité analogue pour distinguer les différents rayons réfrangibles qui influencent une substance chimique sensible, si ce n'est le nouvel état moléculaire de cette substance.

On doit remarquer qu'il se produit ici à l'extrémité la plus réfrangible du spectre le même effet que celui qui a lieu à l'extrémité la moins réfrangible quand des écrans incolores agissent sur les rayons calorifiques, et l'on a vu dans le livre I[er], page 28 et suivantes, comment ces écrans absorbaient inégalement la partie infra-rouge prismatique.

Prismes différents. — Dans les expériences précédentes on aurait pu craindre que les rayons lumineux, après avoir traversé les écrans transparents, aient pu être absorbés par la matière du prisme de flint, du moins dans les parties les plus réfrangibles. Pour examiner jusqu'à quel point cet effet pouvait avoir lieu, j'ai fait usage de prismes de différentes substances, et successivement de prismes de sel gemme, de cristal de roche et d'alun.

On doit également avoir soin de se servir d'une glace métallique pour réfléchir le faisceau de rayons lumineux qui pénètre dans la chambre noire, car sans cela, avec une glace de verre étamé, les rayons avant de se réfléchir sur la seconde surface traversent l'épaisseur de la glace, de sorte qu'en entrant dans la chambre obscure ils sont dans le même état que s'ils avaient traversé un écran de flint d'une épaisseur double de celle de la glace. On a disposé l'appareil comme précédemment, si ce n'est qu'il n'y avait pas de lentille derrière le prisme de sel gemme ou de quartz dont on se servait. En plaçant, par exemple, un prisme de sel gemme derrière l'écran muni de deux ouvertures, on a deux spectres comme ci-dessus; mais devant une des ouvertures on a fixé une plaque de flint glass d'un centimètre d'épaisseur, de sorte qu'un des spectres était formé par des rayons qui n'avaient traversé que du sel gemme, l'autre par des rayons qui avaient traversé le sel gemme et l'écran de flint glass.

En recevant ces deux spectres sur une plaque iodurée ou sur une feuille de papier enduite d'iodure d'argent, si l'on ne laisse durer l'action que quelques secondes, on a seulement une impression vers la partie la plus réfrangible du spectre, et on reconnaît que l'étendue des deux spectres est sensiblement la même; s'il y a une légère différence, c'est en faveur du spectre formé par les rayons qui n'ont traversé que le sel gemme, c'est-à-dire que le spectre ainsi produit s'étend un peu au delà de P. Ainsi, le flint glass blanc très-limpide agit à très-peu de chose près comme le sel gemme sur les rayons ultra-violets qui colorent l'iodure d'argent; cependant, il manifeste une légère action absorbante sur les rayons extrêmes P.

Lorsqu'on emploie un écran de verre à vitre au lieu de flint, le spectre formé par les rayons qui traversent cet écran est moins étendu que l'autre dans le sens de la plus grande réfrangibilité, et il se termine entre M et N, de sorte que toute la partie NP est absorbée.

En employant un prisme d'alun au lieu d'un prisme de sel gemme, on trouve la même étendue aux deux spectres, dont l'un est formé par les rayons qui ne traversent que l'alun, tandis que l'autre est dû aux rayons qui ont traversé l'écran de flint. Avec un prisme de quartz blanc, l'étendue de la partie ultra-violette est plus grande. On a vu dans le premier volume, page 140, que, d'après les recherches de MM. Helmholtz, Muller, etc., le spath d'Islande avait même encore une plus grande transparence que le quartz pour les rayons ultra-violets.

On voit donc qu'en employant différents prismes solides, les résultats sont les mêmes qu'avec le flint bien pur, en ce qui concerne l'étendue des parties actives comprises entre A et H bien entendu, car pour la partie extrême de l'ultra-violet elle est plus étendue avec le quartz et le spath d'Islande qu'avec les verres les plus blancs.

On peut remarquer aussi qu'avec ces prismes différents les maxima d'action sont situés aux mêmes places si l'on n'a égard qu'à leur position relative par rapport aux raies du spectre solaire ; car l'on sait très-bien que quoique les raies soient les mêmes avec différents prismes, cependant leur position relative change un peu, le pouvoir dispersif des diverses substances n'étant pas le même et les couleurs n'occupant pas toujours le même étendue relative.

Quand, au lieu de prismes solides, on fait usage de prismes liquides terminés par des lames minces de flint, on observe que la position des maxima d'action correspond aux mêmes raies que précédemment ; le liquide agit en outre comme écran en absorbant certaines parties du rayonnement lumineux ; alors l'étendue du spectre du côté du rouge A reste semblable ; mais du côté de l'ultra-violet P elle peut varier beaucoup. Si l'on prend, par exemple, un prisme de sulfure de carbone, dont le pouvoir dispersif est si considérable, on a un spectre lumineux excessivement étalé ; mais comme cette substance, arrête les rayons situés depuis I jusqu'en P, l'action chimique ne se manifeste que de A en F pour les rayons les moins réfrangibles, et de F en I pour les autres. Ainsi les raies N, O, P ne peuvent plus être dessinées chimiquement avec ce prisme. Avec d'autres prismes liquides les résultats seraient analogues, c'est-à-dire que la substance

agirait non-seulement comme prisme, mais encore comme écran.

Écrans colorés. — Si les écrans transparents et incolores n'exercent une action absorbante énergique que sur la partie ultra-violette du spectre (ce qui est une conséquence de l'unité du rayonnement, car ils ne sont incolores que parce qu'ils absorbent de la même manière les rayons compris entre les réfrangibilités extrêmes A et H), et si les effets chimiques dans chaque partie du spectre sont en rapport avec les effets lumineux, les écrans colorés peuvent agir par absorption sur quelques-unes des parties visibles du spectre, et on doit trouver que les images photographiques des mêmes parties font défaut; c'est ce que les résultats suivants vont démontrer :

On a fait usage du même procédé expérimental que celui qui a été employé plus haut page 103, et au lieu de placer un écran incolore en face d'une des ouvertures de l'écran métallique qui se trouve devant le prisme, on a mis les écrans colorés dont on voulait examiner l'action.

En employant un verre rouge assez foncé coloré par le protoxyde de cuivre, verre qui est monochromatique puisqu'il ne laisse passer que le rouge et le commencement de l'orangé prismatique, on ne voit sur l'écran qui reçoit les spectres que la partie lumineuse comprise entre A et le milieu de l'orangé, et qui donne une teinte rouge bien prononcée; les lignes noires dans cette bande lumineuse se distinguent assez bien. Cette image se termine après A, et ensuite brusquement de l'autre côté, entre C et D; on reconnaît, en outre, une légère lueur vers F, indiquant que des rayons de cette réfrangibilité traversent cet écran. Pour suivre aisément cette description on peut se reporter à la planche fig. 13, page 80.

En recevant le spectre sur de l'iodure d'argent primitivement impressionné, voir page 89, au bout de deux heures d'action d'un soleil énergique on distingue une impression sur la plaque après l'avoir passée au mercure, impression qui correspond exactement à la partie éclairée en rouge et qui se termine aux mêmes lignes; les raies *a* sont assez bien définies. De plus, on reconnaît une légère action vers F, indiquant que des rayons de cette réfrangibilité ont impressionné la plaque.

On voit ainsi que là où la lumière est absorbée totalement il n'y a pas d'action chimique, et que par rapport à l'iodure d'argent ce verre rouge ne laisse passer presque en totalité que les rayons qui continuent l'action chimique commencée.

D'autres verres rouges moins foncés donnent les mêmes résultats,

si ce n'est que l'on a un plus grand nombre de rayons situés vers F et impressionnant la plaque. On reconnaît ainsi qu'il est possible que des verres rouges très-foncés laissent passer des rayons d'autre réfrangibilité que le rouge, et que l'iodure soit impressionné par des rayons correspondant au bleu ou au vert prismatique; on pourrait donc être induit en erreur en se servant d'un écran rouge, si l'on supposait que cet écran ne laisse passer que des rayons dont la réfrangibilité correspond à cette nuance. Il en serait de même avec d'autres verres colorés pour des parties différentes du spectre, et les expériences faites par leur concours ne peuvent indiquer immédiatement la réfrangibilité des rayons actifs d'après la couleur de ces écrans à lumière diffuse.

Quand on place sur la route d'un des faisceaux de rayons lumineux avant sa réfraction un verre jaune clair, on voit que la partie la moins réfrangible du spectre, c'est-à-dire celle qui est située entre A et F, passe en totalité, tandis que les rayons bleus, indigo et violets sont en partie absorbés; cela fait qu'au delà de G on ne distingue plus aucune trace de lumière. Lorsqu'on reçoit le spectre sur l'iodure d'argent déjà impressionné, on reconnaît qu'entre A et F la plaque reçoit une impression due à l'action des rayons les moins réfrangibles; mais on aperçoit aussi une action dans les rayons les plus réfrangibles, jusqu'en I d'un côté, et de l'autre jusqu'entre G et F.

Une solution de persulfocyanure de fer est obtenue en versant du sulfocyanure de potassium dans une solution d'un sel de peroxyde de fer. Lorsqu'elle est assez concentrée, elle a une couleur rouge qui est à peu près la même que celle du verre rouge coloré par le protoxyde de cuivre. Placée dans un écran de verre à faces parallèles, elle peut être mise sur la route du faisceau lumineux avant sa réfraction. Si on l'étend d'eau, elle jaunit, et en solution étendue, elle a une couleur jaune.

Avec la solution étendue on observe les mêmes effets qu'avec le verre jaune, lorsqu'on la met sur le trajet du faisceau de rayons lumineux; c'est-à-dire que la portion AF du spectre passe sans altération, tandis que la région HF est à peu près absorbée. Quant aux parties impressionnées de l'iodure, elles suivent les parties lumineuses : la partie FA passe sans absorption; on distingue une impression légère dans la partie FI, correspondant aux rayons les plus réfrangibles, et IP est totalement absorbé.

Avec la solution concentrée on a les mêmes résultats qu'avec le verre rouge, c'est-à-dire que la partie AC du spectre lumineux et peut-

être un espace s'étendant au delà de C, entre C et D, sont seuls apparents. En exposant dans le spectre de l'iodure déjà un peu impressionné, après deux heures d'action on a une impression entre les mêmes limites. Si cette substance sensible n'est pas impressionnée primitivement, les phénomènes sont à peu près les mêmes, si ce n'est qu'il faut plus de temps; car la lumière diffuse qui accompagne toujours le faisceau lumineux introduit dans la chambre obscure impressionne assez la plaque pour que la partie AC agisse énergiquement.

Une solution concentrée de tournesol paraît rouge par transmission, et agit comme un verre rouge; très-étendue, elle est bleue, et dans des proportions intermédiaires, elle semble violette. En opérant avec une solution violette placée dans l'écran de verre, on reconnaît que cette substance laisse passer la partie rouge AC du spectre lumineux; il y a une interruption de C entre D et E, au commencement du vert, puis on distingue la partie lumineuse depuis cette limite jusqu'en H, qui ne paraît que peu affaiblie.

L'impression sur la plaque d'argent iodurée donne les résultats suivants : si l'exposition ne dure que plusieurs minutes, on a une impression depuis F jusqu'au delà de H, correspondant aux rayons les plus réfrangibles; si l'action dure plus longtemps, une heure ou deux, l'impression a lieu depuis F jusque entre D et E, là où les rayons lumineux diminuent d'intensité, et ensuite on a une image de C en A correspondant à la partie lumineuse AC.

Les verres bleus colorés par le cobalt donnent, comme on le sait, une image du spectre traversée par des bandes d'absorption (*voir* page 7) : si la teinte du verre est assez foncée, on distingue la partie AC rouge, puis un intervalle obscur AE, et ensuite la partie bleue, indigo et violette, qui paraît passer presque sans absorption. Si le verre est moins foncé et même assez clair, on voit d'abord la partie AC lumineuse rouge assez intense indiquant que ces rayons passent presque sans absorption; puis un espace qui s'étend de D au milieu de DE, et qui est jaune, mais moins lumineux que le jaune prismatique; l'intervalle entre ces deux portions prismatiques éclairées est plus obscur, mais au milieu, entre C et D, on a une faible teinte orangée. En E on a une partie lumineuse EH, qui commence à la fin du vert et qui finit à la limite extrême ordinaire du violet. Ainsi il y a quatre parties lumineuses, séparées par trois bandes obscures.

Quand on fait agir sur l'iodure d'argent le spectre formé par le fais-

ceau des rayons qui ont traversé cet écran, on observe d'abord une action de X en F; si l'iodure a été impressionné, au bout d'une heure et demie d'action, en outre de l'effet produit dans les rayons les plus réfrangibles, on distingue une impression de F en E, et une autre de C en A correspondant à la partie lumineuse. L'intervalle CE sur la plaque reste net, car l'intensité des rayons jaunes ne paraît pas dépasser celle de AC; et pour que cela soit il faut que vers D les rayons éprouvent une absorption assez forte. Mais au bout de trois heures et demie d'action sur la plaque on a une impression correspondant à la partie jaune vers D. Ainsi les trois parties les plus lumineuses des rayons qui ont traversé l'écran bleu ont exactement leurs correspondantes dans les impressions sur la plaque d'argent iodurée. Il est probable qu'une action d'une journée aurait donné un indice de la faible bande orangée; mais l'expérience serait difficile à faire, en ce qu'on ne distingue qu'avec peine cette partie du spectre de la lumière diffuse qui l'environne, et qui agit aussi à la longue sur la plaque.

On voit donc qu'avec les différents écrans colorés les parties du spectre lumineux qui sont absorbées correspondent exactement aux régions où les impressions chimiques n'ont pas lieu; mais il faut avoir égard à l'étendue des parties actives du spectre sur les matières impressionnables, et à la position relative du maximum de lumière et des maxima d'action chimique sur ces substances.

Dans l'examen de ces divers effets, il faut aussi remarquer que les impressions lumineuses sur la rétine ne se font pas dans les mêmes conditions que les réactions chimiques que l'on observe : en effet, si un faisceau lumineux de très-faible intensité frappe la rétine, il ne donne aucune impression sensible; centuplez ce rayon, et vous aurez une action marquée. Mais faites que ces cent rayons égaux au premier ne viennent que successivement frapper la rétine, au lieu d'arriver ensemble, alors ces actions ne s'ajouteront pas, et il n'y aura aucune action produite; de sorte que l'on pourra recevoir pendant des heures entières l'action d'un rayon lumineux excessivement faible sans rien apercevoir.

Quant aux actions chimiques, il n'en est pas de même : un faisceau de rayons d'une intensité très-petite ne produira aucune action ; mais que cent faisceaux de rayons égaux au premier viennent frapper la matière sensible ensemble ou successivement, elle recevra la même impression,

car il se produira la même somme d'action chimique; de sorte qu'au bout de plusieurs heures un faisceau de rayons excessivement faible pourra être rendu appréciable par son action chimique sur une surface donnée. Ces différences d'effets proviennent de ce que la rétine ne conserve que pendant un temps très-court l'impression de la lumière, tandis que la substance chimique sensible conserve et accumule l'impression qu'elle reçoit des rayons lumineux.

§ 3. *Sources lumineuses diverses : lumière électrique, flammes.*

On a vu quels sont les éléments de la lumière solaire qui exercent une action chimique sur un grand nombre de substances. Si l'on vient à faire agir d'autres sources lumineuses sur les matières impressionnables, les effets produits dépendront de la composition de la lumière de ces sources ainsi que de leur intensité. On observe donc des effets analogues à ceux dont on est témoin dans les phénomènes de phosphorescence, et dont il a été question dans le tome I[er], page 325.

A composition lumineuse égale, l'intensité des rayons influe seule; à intensité égale, plus les sources renferment d'éléments actifs, plus elles agissent vivement. Mais comme les différentes matières impressionnables sont affectées entre des imites différentes de réfrangibilité, une lumière active pour une substance peut être inactive pour une autre, et *vice versa*. Cependant, puisqu'en général, sauf pour le cas des matières organiques, les sels métalliques impressionnables sont influencés par la partie violette et ultra-violette de l'image prismatique, quand ces sources renferment en abondance des éléments très-réfrangibles, elles agissent avec efficacité principalement sur les composés d'argent.

Les flammes provenant des matières carbonacées, comme les huiles grasses, l'acide stéarique et le gaz d'éclairage, ont beaucoup de rayons rouges et jaunes et peu de rayons bleus; de là leur peu d'efficacité sur les changements de couleur des sels d'argent, et à plus forte raison quand étant mélangées d'air elles ont perdu leur pouvoir éclairant. Si la température de combustion est plus élevée, comme avec le chalumeau à gaz oxygène et hydrogène, dans lequel un fragment de chaux ou de magnésie est porté à l'incandescence, la lumière est plus vive quoique présentant toujours les éléments jaunes et rouges. Mais quand la température est plus élevée encore, et peut-être aussi en raison des éléments que la flamme contient, comme lors de la combustion du

magnésium dans l'air, alors les rayons bleus et violets sont en plus grande proportion, et l'activité chimique de la flamme est assez grande.

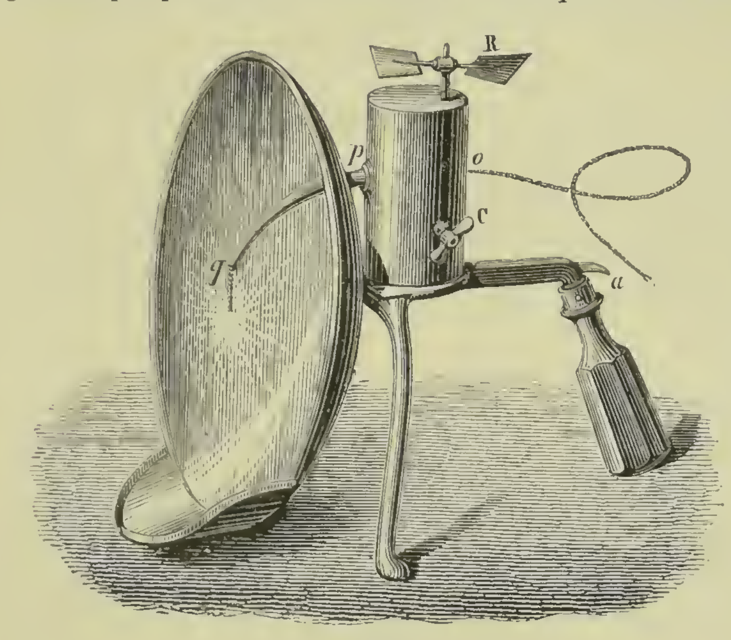


Fig. 11.

On a vu dans le premier volume combien il était facile dans la lampe au magnésium que l'on représente ici de nouveau, fig. 11, de régler la combustion de fils ou de lames de ce métal à l'extrémité du conduit métallique Pq ; quand on songe à l'activité de la lumière émise, on voit qu'on peut très-utilement se servir de cet appareil pour les besoins de la photographie.

Ainsi, quand les sources lumineuses doivent leur lumière à l'irradiation d'un corps solide opaque et incandescent, la proportion des rayons très-réfrangibles et, par suite, l'activité chimique sur les corps impressionnables dans la partie la plus réfractée du spectre dépendent de la température de combustion. Il résulte de là que l'arc voltaïque formé entre des pointes de charbon dont la température est encore plus haute (*voir* tome Ier, page 128) dépasse encore en activité la source précédente ; aussi peut-on répéter avec un faisceau émané d'un appareil photo-électrique un certain nombre des expériences faites avec un faisceau de rayons solaires. La figure 27 *bis*, représentée de nouveau page 118, indique la disposition employée quand on se sert d'un régulateur de lumière électrique pour produire, par réfraction dans un prisme *P*, un spectre lumineux que l'on fait agir sur des substances impressionnables.

La coloration d'une flamme, même par une très-faible quantité de matières étrangères, peut exercer la plus grande influence sur l'action chimique qu'elle exerce. D'après MM. Bunsen et Roscoe, la flamme non éclairante du gaz d'éclairage mélangé d'air, ou la flamme inactive de l'alcool, colorée en rouge par le chlorure de lithium ou de strontium, ou colorée en jaune par le chlorure de sodium ou de potassium, ou

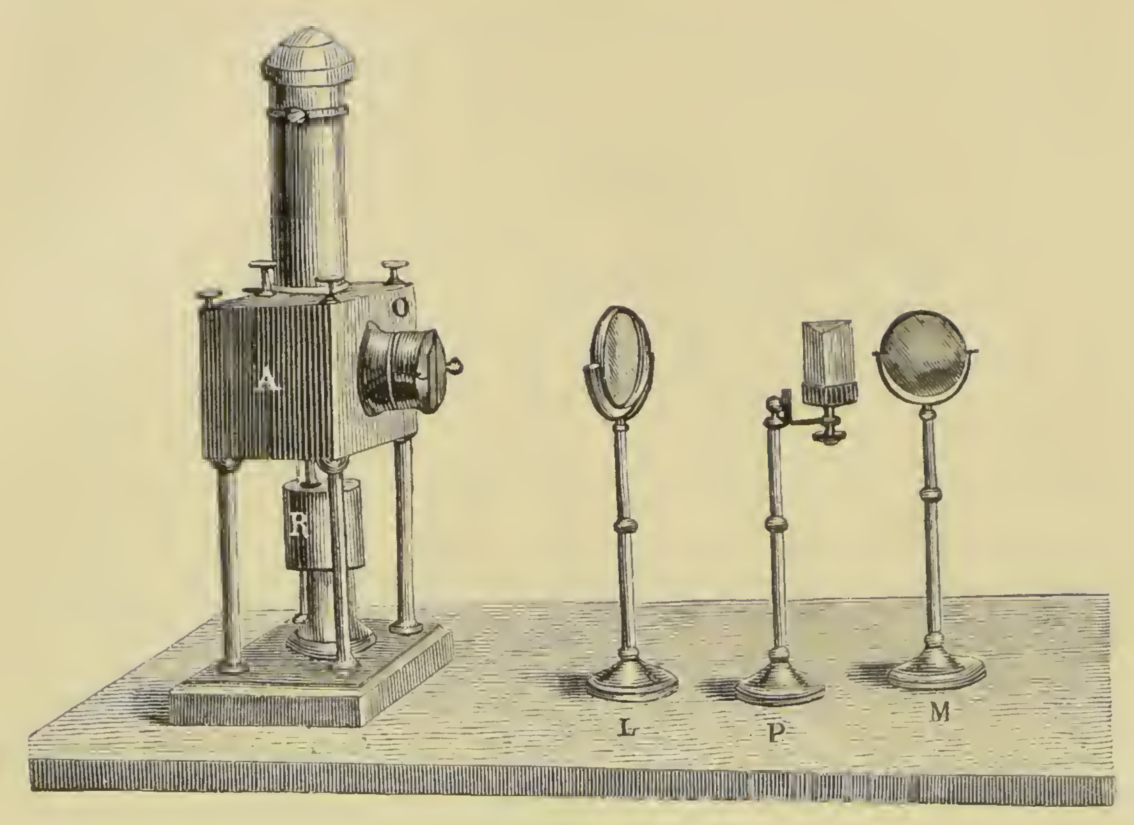


Fig. 27 *bis*.

bien encore rendue verte par le chlorure de baryum, ne donne aucune action chimique sur le mélange de chlore et d'hydrogène; mais la flamme verte bleuâtre assez vive obtenue avec le chlorure de cuivre volatilisé ainsi que la flamme terne du chlorure d'antimoine contiennent des éléments très-réfrangibles, et ont une action plus grande que celle du gaz d'éclairage ordinaire.

La combustion du sulfure de carbone donne également des rayons violets et ultra-violets; on peut se procurer aisément une flamme de ce genre en remplaçant, dans une lampe à alcool, le liquide par du sulfure de carbone. Il faut seulement, à l'aide d'une petite cheminée, rejeter en dehors de la pièce où l'on opère les produits de la combustion, qui sont dangereux pour la respiration. Avec une flamme de ce genre on colore en quelques minutes une feuille de papier recouverte de chlorure d'argent et placée à quelques centimètres de distance.

On peut encore citer comme source lumineuse active l'arc voltaïque formé entre des électrodes en mercure, et par exemple la lampe imaginée par M. Way, et dont la lumière est due à l'incandescence de la vapeur mercurielle (1).

(1) Voir Ier volume, page 186. — *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, t. 8, p. 186-1861.

J'ai montré dernièrement (1) comment on pouvait colorer les étincelles électriques de façon à donner des lumières de différentes nuances, et cela au moyen d'une disposition assez simple; je pense donc utile de l'indiquer ici. Il suffit, pour obtenir ce résultat, d'exciter des décharges d'un appareil d'induction entre l'extrémité d'un fil de platine et la surface supérieure d'une dissolution contenant un sel aisément vaporisable. Voici la disposition expérimentale employée :

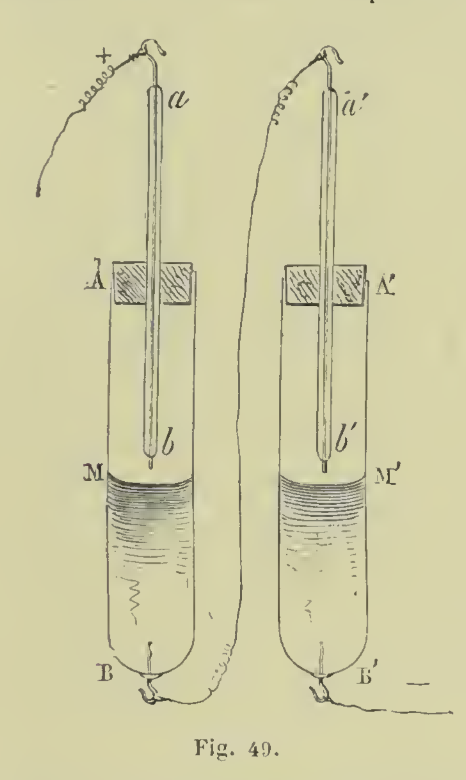


Fig. 49.

Soit AB, fig. 49, un tube fermé par en bas et traversé par un fil de platine B, qui fait communiquer le liquide remplissant environ la moitié du tube avec une des extrémités du fil extérieur d'une forte bobine d'induction; le fil de platine *ab*, qui pénètre par en haut dans le tube, passe dans l'intérieur d'un tube capillaire, et ne dépasse ce dernier que d'une longueur d'un millimètre environ; son extrémité *b* est placée à quelques millimètres seulement de la surface M du liquide. L'extrémité *a* du fil de platine supérieur touche à l'autre extrémité du fil induit, de sorte que l'interrupteur de l'appareil d'induction venant à fonctionner, des décharges se succèdent à des intervalles plus ou moins rapprochés entre la pointe *b* du fil de platine et la surface M du liquide. Pour que les étincelles ne partent pas entre l'extrémité *b* du fil et le

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 65, p. 1097 (1867), et t. 66, p. 121, janvier 1868. J'ai su, depuis la publication de ces recherches, que M. Séguin avait déjà observé que lorsque les décharges d'un appareil d'induction éclatent entre un fil de platine et la surface d'une dissolution saline, la base du sel dissous imprime à l'auréole une coloration assez intense dépendant de sa nature (*Annales de chimie et de physique*, 3me série, t. 69, p. 108-1863).

M. Séguin pensait que l'effet n'était bien marqué que si la dissolution formait le pole positif, et qu'elle dépendait de l'action mécanique produite dans le sens de la décharge; mais c'est précisément le contraire qui a lieu, comme on va le voir, et cette différence tient à ce que M. Seguin n'avait pas déterminé exactement le sens de la décharge; d'après mes observations, l'effet de coloration n'est donc pas dû à un simple transport mécanique du sel dissous.

tube de verre, on donne à celui-ci un diamètre assez grand, 25 à 30 millimètres au moins; sa hauteur AB est de 12 à 15 centimètres.

Lorsque le liquide est de l'eau pure, les décharges ont une couleur très-pâle; mais si l'eau renferme en dissolution quelques faibles quantités d'un sel aisément vaporisable, comme le chlorure de sodium, de calcium, etc., alors les décharges sont vives et colorées de nuances différentes. Si l'appareil d'induction est de faible puissance, on peut n'observer aucun effet de coloration quand l'extrémité *b* du fil *ab* est négatif; il faut qu'il soit positif. Mais si la bobine est puissante comme celle décrite tome I[er], page 204, alors on observe une action, quel que soit le sens de la décharge, et l'auréole dont s'entoure celle-ci présente dans les deux cas des effets de coloration; toutefois, le maximum est donné quand le fil *ab* est positif. Ce résultat est contraire à ce que l'on aurait pu supposer, car on sait que le transport de la matière dans l'arc voltaïque comme dans les liquides traversés par l'électricité a lieu dans le sens de la direction du pôle positif au pôle négatif; il est probable, dans ce cas, qu'il se produit à la surface du liquide une décomposition polaire donnant lieu à une réduction du métal, cause de la coloration de la décharge. Avec un appareil d'induction d'une certaine énergie, l'intensité lumineuse de la décharge ainsi que les nuances qu'elle présente prennent un grand éclat.

La composition lumineuse étudiée par réfraction est plus complexe que celle qui résulte de l'introduction dans la flamme non éclairante d'un bec de gaz de quelques traces de sels renfermés dans la dissolution, et le nombre des raies ou bandes lumineuses que l'on voit est plus grand que dans ce dernier cas. D'abord l'eau est elle-même vaporisée, et l'on a en même temps que les raies, qui dépendent des composés dissous, la composition lumineuse, qui appartient à ses éléments constituants; d'un autre côté, comme on le sait d'après les expériences faites avec les étincelles électriques qui éclatent entre des conducteurs solides, la température est plus élevée que celle de la flamme d'un bec de gaz. Quant aux lignes qui proviendraient de la volatilisation du platine, elles doivent être faibles, car avec l'eau je ne les ai pas distinguées; avec les autres métaux il pourrait n'en être pas de même.

Quand on se sert de dissolutions concentrées, les effets lumineux sont très-marqués, et avec les chlorures notamment ils sont très-brillants. Les décharges prennent un grand éclat avec le chlorure de strontium (teinte rouge), avec le chlorure de calcium (teinte orangée),

le chlorure de sodium (teinte jaune), le chlorure de magnésium (teinte verte), le chlorure de cuivre (teinte verte-bleuâtre), et le chlorure de zinc (teinte bleue). Mais d'autres sels en dissolution dans l'eau, comme divers composés de baryum, de potassium, d'antimoine, de fer, de manganèse, d'argent, d'uranium, etc., donnent également des effets plus ou moins marqués.

On peut s'arranger pour faire succéder les décharges à des intervalles très-courts, de façon à ce que le phénomène paraisse presque continu; on a alors comme une flamme colorée, et le tube au milieu duquel cet effet est produit fonctionne à la manière d'une petite lampe dont la source lumineuse a une composition et une couleur déterminées. Quand on agit ainsi, le passage de l'électricité élevant la température du liquide, il faut prendre le tube un peu grand ou opérer dans une capsule.

La figure 49, page 119, représente deux tubes placés à la suite l'un de l'autre, de façon que chaque décharge les traverse simultanément; on pourrait en disposer ainsi plusieurs, et avoir à la fois des flammes de diverses couleurs.

On s'est borné dans ce chapitre à indiquer les différentes sources lumineuses dont on peut se servir; dans le chapitre IV il sera question de la comparaison des intensités de différentes flammes, en se servant de plusieurs des réactions chimiques qu'elles peuvent manifester.

CHAPITRE III.

Effets électriques produits sous l'influence de l'action chimique de la lumière.

§ 1. *Effets observés avec les lames métalliques et les substances impressionnables.*

Chaque fois que des réactions chimiques ont lieu, les corps entre lesquels elles s'exercent manifestent des effets électriques qui peuvent être

rendus sensibles à l'aide des galvanomètres, si ces corps sont suffisamment conducteurs de l'électricité ; or, la lumière produisant de nombreuses réactions, comme on l'a vu précédemment, on doit pouvoir obtenir des effets électriques en disposant convenablement les appareils. Les premières tentatives que j'ai faites dans cette voie datent de 1839 (1) : J'avais remarqué qu'en faisant agir un faisceau de rayons solaires sur deux liquides agissant chimiquement l'un sur l'autre et superposés avec soin dans un vase en verre, il se développait un courant électrique accusé par un galvanomètre très-sensible dont les deux extrémités étaient en relation avec deux lames de platine plongeant dans chacune des dissolutions; Je me suis aperçu plus tard (2) que dans ces expériences on observait un phénomène complexe, et que les résultats présentaient également l'effet produit sur les lames métalliques elles-mêmes. J'ai donc été conduit à faire plusieurs séries d'expériences touchant l'action des rayons solaires sur les lames métalliques.

Pour observer les effets du rayonnement solaire, on prend une boîte en bois ou bien un vase en verre, fig. 50, noirci intérieurement et divisé,

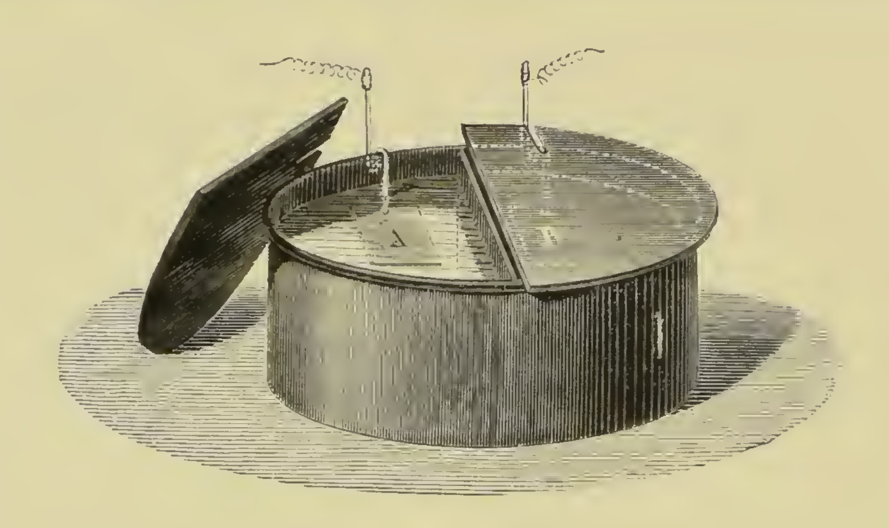


Fig. 50.

au moyen d'une membrane très-mince, en deux compartiments que l'on remplit de la solution d'essai. Dans chacun de ces compartiments, on plonge des lames de platine ou d'or A et B, après les avoir préalablement chauffées au rouge. Ces lames, placées horizontalement dans

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 9, p. 145, juillet 1839.

(2) *Id.*, t. 9, p. 561. — Thèse à la faculté des sciences de Paris, publiée le 4 août 1840. — *Biblioth. univ. de Genève,* nouvelle série, t. 35, p. 136 (1841). — *Ann. de chimie, et de physique,* 3ᵉ série, t. 56, p. 99.

l'appareil, sont mises en relation avec un multiplicateur qui doit être à très-long fil pour être plus sensible; on peut le prendre de 25 à 30 mille tours. Enfin, on recouvre chaque compartiment avec une planchette, afin d'intercepter l'action de la lumière solaire; quand on veut opérer, on enlève successivement chacune d'elles.

En opérant avec une solution alcaline, on trouve que la lame exposée aux rayons solaires directs prend au liquide l'électricité négative; avec une solution acide, elle prend au contraire l'électricité positive. Les déviations de l'aiguille aimantée du galvanomètre peuvent être de plusieurs degrés.

On est porté naturellement à admettre d'abord que ces effets sont dus uniquement au rayonnement calorifique qui échauffe une des lames, tandis que l'autre reste à la température ordinaire; mais il n'en est pas ainsi, comme on le verra ci-après.

On a déterminé l'influence de plusieurs écrans de verre coloré sur la production du phénomène, en évaluant la déviation maximum de l'aiguille aimantée du galvanomètre par première impulsion, quand ces écrans ont été interposés sur la route des rayons lumineux avant de frapper chaque lame; les déviations ne doivent être considérées que comme donnant le plus ou le moins d'effet produit sur les lames.

Voici le résultat d'une des expériences qui ont été faites : on a placé dans le même tableau les résultats des effets calorifiques observés à l'aide d'une pile thermo-électrique exposée aux rayons solaires en interposant les mêmes écrans sur la route des rayons solaires; les nombres qui sont dans les troisième et cinquième colonnes du tableau expriment les rapports des effets produits par les rayons solaires sur les lames métalliques et sur la pile thermo-électrique, en représentant par 100 l'action exercée sans l'interposition d'aucun écran :

ÉCRAN.	EFFET PRODUIT SUR LA LAME DE PLATINE.		EFFET PRODUIT SUR UNE PILE THERMO-ÉLECTRIQUE.	
	Intens. du courant électrique par 1re impulsion.	Rapport des effets produits.	Intens. du courant électrique par 1re impulsion.	Rapport des effets produits.
Sans écran.......	° 4,5	100	13,2	100
Verre violet......	1,5	33	8,5	64
— bleu.......	1	22	4,0	30
— jaune......	»	»	11,0	83
— rouge......	0	0	7,0	53
— vert.......	»	»	0	0

On reconnaît que l'ordre des écrans n'est pas le même, et que les verres rouges et jaunes, qui sont très-perméables aux rayons les moins réfrangibles agissant sur la pile thermo-électrique, arrêtent à peu près toute action sur la lame de platine.

Les effets observés avec les différentes parties du spectre solaire conduisent à la même conclusion : on a appliqué verticalement une des lames de platine, chauffée préalablement au rouge, sur une des faces d'une boîte en verre qui avait été noircie, à l'exception de la partie qui se trouvait vis-à-vis de la lame; les extrémités du galvanomètre communiquaient, l'une avec cette lame, et l'autre avec une seconde lame plongeant aussi dans de l'eau acidulée qui remplissait la boîte et qui était complétement cachée à la lumière. Ayant alors projeté successivement sur cette lame les rayons colorés d'un spectre solaire formé en réfractant les rayons directs du soleil, on a obtenu les résultats suivants :

Aucune action dans les rayons.... { rouges. orangés. jaunes. verts.

Faible action dans les rayons.... { bleus. indigo.

Action marquée dans les rayons violets.

Il faut remarquer que toutes les fois que les lames sont très-propres, qu'elles ont séjourné dans l'acide azotique concentré, et qu'elles ont été portées à la température rouge, les différentes parties du spectre sont à

peu près sans effet pour déterminer la production des courants électriques dont nous recherchons la cause.

Ces résultats tendent à montrer que les rayons qui agissent sur des lames de platine ou d'or plongées dans des dissolutions sont plus réfrangibles que les rayons calorifiques.

D'autres métaux que l'or et le platine, et en particulier des métaux altérables, comme le laiton et l'argent, donnent lieu à des effets analogues; bien plus, la polarisation préalable des lames, surtout si celles-ci ayant été plongées dans de l'eau ont été mises en contact avec le pôle positif d'une pile, peut augmenter beaucoup l'effet électrique observé.

M. Grove (1) a fait depuis des expériences analogues aux précédentes et a observé, comme je l'avais déjà trouvé, que la lumière peut exercer une influence sur des lames de platine polarisées, plongées dans de l'eau acidulée et en relation avec les deux extrémités d'un multiplicateur. Dans ce cas, la polarisation primitive des lames de platine est augmentée, et l'effet produit ne semble pas dû à une action calorifique qu'exercerait l'action solaire.

On peut se demander maintenant quel est le mode d'action de la lumière dans les circonstances actuelles; c'est une question à laquelle il est difficile de répondre. Cependant, comme les effets sont presque nuls, mais non pas anéantis tout à fait, quand les lames d'or ou d'argent sont parfaitement décapées et ont été chauffées à plusieurs reprises, il pourrait se faire que les effets produits quand elles ne sont pas dans cet état fussent dus à l'action de la lumière sur des corpuscules de matières organiques adhérant aux lames; car toute matière organique tend à se combiner avec l'oxygène sous l'action de la lumière, ainsi qu'on l'a vu antérieurement page 57, et dans cette réaction l'eau qui renferme de l'oxygène jouerait le même rôle que l'oxygène atmosphérique. Si cet effet n'a pas lieu et s'il ne se produit pas une altération des lames, il faut que la lumière détermine un trouble dans l'état d'équilibre des particules; mais la première supposition est la plus probable.

Quand des lames métalliques inoxydables se trouvent recouvertes de composés altérables à la lumière, alors ces matières se décomposant, si un des éléments peut se dissoudre dans le liquide conducteur, on observe, au moment de la séparation de ces éléments, un courant électrique

(1) Voir *Philosophical Magasine*, décembre 1858. — *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 56, p. 99.

qui peut être assez énergique. Examinons ce qui se passe avec les composés d'argent, qui sont si éminemment impressionnables, et principalement le chlorure et le bromure d'argent, préparés par précipitation à l'obscurité.

Lorsque le chlorure d'argent est exposé à la lumière, il perd de son chlore et se change en sous-chlorure; d'un autre côté, ce composé n'étant pas conducteur de l'électricité quand il est en masse, et le devenant quand il est en couche très-mince, il s'ensuit que l'on peut observer des effets électriques produits sur ce corps lorsqu'il subit des réactions chimiques sous l'influence de la lumière. A cet effet, on l'étend, quand il est nouvellement préparé par précipitation, sur une lame de platine plongée dans l'eau; dès l'instant qu'elle est exposée aux rayons solaires, le chlorure noircit, et l'aiguille du galvanomètre est déviée dans un sens qui annonce que la lame est positive. Ce résultat est facile à expliquer : le chlorure d'argent en se décomposant prend l'électricité positive, qu'il transmet à la lame de platine avec laquelle il est en contact, tandis que le liquide prend l'électricité négative. Dans ce cas, on ne peut opérer avec une lame d'argent, attendu que la réaction du chlore, qui provient de la décomposition du chlorure, produit en réagissant sur l'argent un courant électrique inverse de celui que l'on étudie. Ces effets ne peuvent être attribués à l'action du rayonnement solaire sur le platine, vu que la lame de platine lorsqu'elle est parfaitement décapée et qu'elle est exposée seule à l'action des rayons solaires, non-seulement est négative, mais encore ne produit qu'un courant électrique donnant une déviation qui ne peut surpasser 1 ou 2°.

Des lames d'or avec le chlorure d'argent se comportent comme des lames de platine. Si l'on veut avoir un courant produit par la décomposition seule du chlorure d'argent, il faut opérer avec de l'eau pure : on prend une lame de platine qui a séjourné quelque temps dans l'eau, et on la recouvre d'une petite feuille de papier non collé; puis on place sur cette lame du chlorure d'argent nouvellement préparé. Le courant produit par la décomposition du chlorure est alors de quelques degrés seulement sous l'influence de la lumière, et plus faible que sans l'interposition du papier.

Le meilleur procédé pour appliquer le chlorure d'argent sur la lame consiste à déposer ce corps au dessus, en couche assez mince, et à faire chauffer doucement la lame dans l'obscurité. L'adhérence du chlorure

sur la lame de platine est assez grande pour qu'il ne s'en détache point, quelle que soit la position que l'on donne à cette lame.

Ce composé nouvellement préparé ayant été placé sur une lame de platine, puis exposé aux rayons solaires, j'ai obtenu un courant initial par première impulsion, de 7°,5 avec un galvanomètre moyennement sensible. Cette expérience, répétée à plusieurs reprises, a donné le même résultat, malgré la coloration du chlorure. Celui-ci étant resté longtemps exposé au soleil, j'ai eu les résultats suivants :

	Déviation par première impulsion.
Le chlorure d'argent, étant blanc, exposé à la lumière a donné un courant de...	7°,5
Après $\frac{1}{4}$ d'heure d'exposition au soleil, le chlorure étant devenu violet foncé....	5°,5
Après $\frac{1}{2}$ heure, le chlorure étant presque noir grisâtre........................	4°,5
Après $\frac{3}{4}$ d'heure, *id.* noir grisâtre........................	4°
Après une heure, *id.*	3°
Deux heure ensuite, *id.*	2°

Le courant électrique étant constant pendant assez longtemps, on peut donc se servir de son action pour étudier l'influence des verres colorés sur la décomposition du chlorure d'argent ; en suivant la marche indiquée précédemment, j'ai trouvé les résultats suivants :

Écrans.	Intensité du courant électrique.	Rapport des effets produits.
Sans écran	15°	100
Verre blanc	10	66
— violet	8	53
— bleu	6	40
— vert		
— jaune	0	0
— rouge		
Sans écran	15	100

On a placé également la lame recouverte de chlorure d'argent dans les divers rayons colorés du spectre solaire, et l'on a vu qu'il n'y avait action produite que dans les rayons bleus, violets et ultra-violets.

Le bromure d'argent, qui se décompose rapidement à la lumière, donne un courant qui est plus intense que celui donné par le chlorure. Ainsi, en recouvrant les deux lames de platine de l'appareil à compartiment, fig. 50, page 122, avant de les plonger dans l'eau acidulée, l'une de bromure et l'autre de chlorure d'argent, à la lumière diffuse, on a eu successivement avec le chlorure 15° de déviation, et 26° avec le bro-

mure ; ce dernier dans les premiers instants a même donné un courant capable de faire dévier l'aiguille du galvanomètre de 55°, quand on a fait tomber sur lui les rayons solaires. Dans une autre expérience, l'aiguille du galvanomètre a été chassée à 75° lors de la décomposition du bromure. Dans chaque expérience l'intensité du courant est variable, et dépend de l'épaisseur de la couche impressionnable étendue sur la lame de platine ou d'or.

On a vu précédemment qu'en opérant avec le chlorure d'argent la déviation par première impulsion était constante pendant un certain temps, lorsque les rayons solaires frappent ce composé ; mais il n'en est pas de même avec le bromure : l'action dans les premiers instants a été plus intense, comme on l'a vu ; mais au bout de peu de temps tout courant a cessé. Si on emploie l'iodure d'argent, qui ne change pas sensiblement de couleur à la lumière lorsqu'on le prépare par précipitation et qu'il est bien lavé, on reconnaît qu'en l'étendant sur une lame de platine plongeant dans l'appareil à compartiment, et qu'on l'expose à la lumière, il rend cette lame assez fortement positive. Le courant électrique produit a même été presque aussi intense que celui présenté par le chlorure d'argent ; cependant, il n'est pas resté constant pendant aussi longtemps, et il est possible que les substances tenues en dissolution ou en suspension dans l'eau aient aidé dans cette circonstance à l'action chimique exercée sur l'iodure.

Ces expériences m'ont conduit à penser qu'en prenant pour lames conductrices des lames d'argent ou de métal altérable, et en formant les composés impressionnables par l'action directe des corps, comme l'oxygène, le chlore, le brome et l'iode sur les lames, les conditions seraient meilleures et les effets électriques observés plus énergiques.

Les lames employées ont d'abord été des lames de laiton ; exposées dans de l'eau légèrement acidulée à l'influence des rayons solaires, elles ont donné lieu à un courant électrique dû probablement à l'action de la lumière sur l'oxyde de cuivre ou sur un composé cuivreux formé. Ces lames ayant servi préalablement d'électrodes positives dans un liquide contenant un chlorure, sont devenues encore plus impressionnables, et même dans le spectre lumineux elles ont présenté une action depuis le rouge jusqu'au bleu avec un maximum dans le vert ; on a vu, page 97, que la partie active du spectre sur le protochlorure de cuivre était à peu près renfermée entre ces limites.

Avec des lames d'argent les effets ont été bien plus énergiques et plus

réguliers ; mais, en outre, on a observé des changements dans la direction du courant électrique produit, suivant la nature ainsi que l'épaisseur de la couche.

En déposant sur une de ces lames une couche mince d'iode, obtenue par l'action de la vapeur d'iode à la température ordinaire, puis en exposant cette lame à la lumière au moyen de l'appareil à compartiment représenté fig. 50, page 122, on a reconnu qu'elle prenait au liquide l'électricité positive; cet effet prouve que la couche d'iodure d'argent est passée à un état d'ioduration moindre.

Avec une couche épaisse d'iode à la surface de l'argent, on a eu, au contraire, un courant électrique inverse du précédent, c'est-à-dire que la lame exposée à la lumière a pris l'électricité négative; ce résultat montre que, dans ce cas, l'iode agit sur l'argent sous l'influence de la lumière. Dans ces diverses expériences, la déviation donnée par le courant électrique était à peu près de 45 à 50° sous l'influence des rayons solaires, et de 10 à 15° à la lumière diffuse.

Avec une couche épaisse d'iode, et les divers écrans de verre coloré dont il a été question plus haut, on a eu :

Écrans.	Intensité du courant électrique.	Rapport des effets produits.
Sans écran	55°	100
Verre violet	22	40
— bleu	14	25,5
— jaune	7	12,7
— rouge	1	1,8

Ainsi, tandis qu'avec le chlorure et le bromure d'argent précipités, placés sur des lames de platine, on avait toujours un courant de même sens, la lame exposée étant positive, avec une couche déposée sur l'argent on a un effet dépendant de l'épaisseur de cette couche. Ces deux effets inverses indiquent qu'il doit y avoir nécessairement une épaisseur pour laquelle l'effet électrique serait presque nul, c'est-à-dire pour lequel le changement chimique serait aussi très-faible. Ce résultat expliquerait peut-être les effets différents obtenus avec des couches minces ou épaisses d'iode et ceux produits dans les rayons rouges extrêmes, comme on l'a vu, page 91 et suivantes.

Avec la vapeur de brôme, la lame d'argent exposée aux rayons solaires est devenue également négative par rapport au liquide comme avec la couche épaisse d'iode. A la lumière diffuse, les effets étaient telle-

ment marqués que la déviation galvanométrique fut de 50°; la lame étant restée exposée à la lumière diffuse pendant 10′, puis mise à l'abri du rayonnement, et exposée de nouveau à son action, la déviation n'a plus été que de 3 ou 4° ; la réaction était alors presque terminée.

Une couche de chlorure d'argent, préparée par l'exposition d'une lame d'argent à l'action du chlore, n'a donné qu'un effet assez faible. Cependant, en déposant sur la surface de la lame le sous-chlorure d'argent violet dont la préparation sera indiquée plus loin, on a une substance qui se prête très-bien à ces expériences et qui donne, pendant longtemps, des résultats comparables entre eux, comme on le reconnaîtra dans le dernier chapitre du livre III relatif à la photographie.

On voit donc qu'en déposant certains corps à la surface de lames métalliques, on peut observer les altérations de ces corps sous l'influence de la lumière par l'effet électrique qui se produit alors.

§ 2. *Actinomètre électro-chimique.*

Les résultats précédents permettent de comprendre comment on peut disposer un appareil qui donne l'indication de l'action chimique produite par la lumière sur une substance, au moyen des courants électriques développés lors de cette réaction. Après bien des essais, je me suis arrêté à la disposition qui va être indiquée et qui permet de faire usage des différents composés d'argent impressionnables, mais surtout de l'un d'entre eux, le sous-chlorure d'argent violet, qui permet, comme on le verra plus loin, de reproduire les couleurs naturelles des rayons lumineux (1).

Il est nécessaire de faire usage de lames d'argent recouvertes de la couche impressionnable et plongées dans un liquide conducteur de l'électricité, mais n'attaquant pas cette matière ; on peut employer comme liquide l'eau acidulée par l'acide sulfurique, ou une dissolution étendue de sulfate de potasse.

L'expérience a prouvé qu'il faut se servir de lames d'argent le plus pur possible, car, sans cela, la couche impressionnable peut s'altérer dans l'eau acidulée et même dans l'eau ordinaire. J'ai préparé alors des lames avec de l'argent obtenu par la réduction du chlorure, et ne contenant pas de traces de cuivre ; ces lames ont 5 centimètres de hauteur,

(1) *Biblioth. univ. de Genève,* 3me série, t. XXXV, p. 136 (1841). — *Ann. de chimie et de physique,* nouvelle série, t. IX, p. 268, 1843 ; — t. XXXII, p. 176, 1851.

3 de largeur, et $\frac{1}{4}$ de millimètre d'épaisseur tout au plus. Elles sont soudées chacune à une petite tige d'argent pur, de manière que cette tige soit dans le plan de chaque lame, et au milieu d'un des petits côtés du rectangle qu'elles forment. Ces tiges servent à établir la communication électrique entre les lames et les extrémités d'un galvanomètre à fil long très-sensible. On peut également couper ces lames d'argent dans une feuille de ce métal, de manière à laisser deux appendices qui remplacent les tiges; de cette façon il n'y a pas de soudure, et les lames comme les parties qui les mettent en relation avec le galvanomètre sont de même substance.

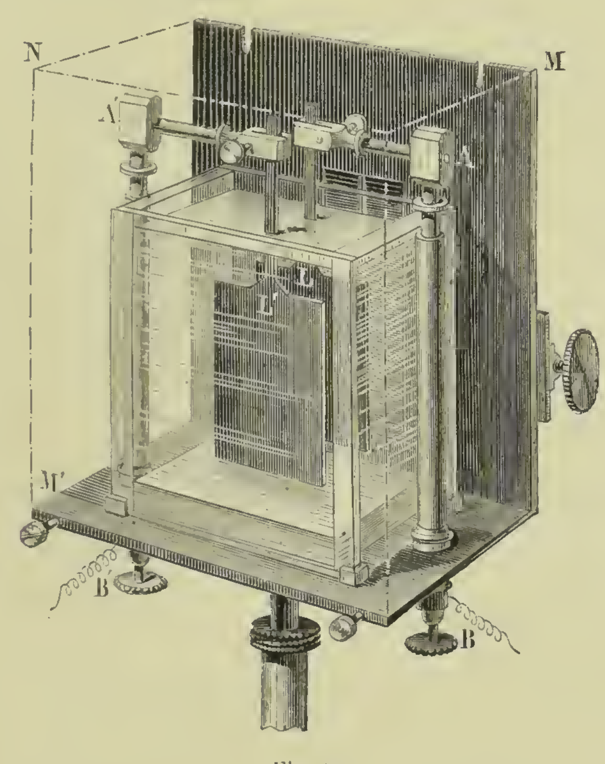


Fig. 51.

La figure 51 donne la disposition de l'appareil. Les deux lames L et L' plongent dans une petite cuve à eau de 6 centimètres de hauteur, sur 6 de largeur et 5 d'épaisseur ; deux montants en cuivre, AB A'B', les maintiennent suspendues au milieu de cette cuve. On les dispose de façon qu'elles soient parallèles à la face antérieure de la cuve à eau, de sorte que, si les trois autres faces de cette cuve sont noircies, ou du moins environnées d'une espèce de boîte en cuivre, et que la lumière arrive seulement par la face antérieure, une seule lame L est exposée à l'action du rayonnement lumineux.

Les deux montants en cuivre AB A'B', qui servent de supports aux lames, sont isolés ou du moins reposent sur des anneaux en ivoire qui sont isolants, de sorte qu'en attachant les extrémités du fil du galvanomètre aux boutons B et B', le circuit électrique se trouve comprendre les deux lames, le liquide de la cuve à eau, les montants en cuivre et le galvanomètre.

Voici les conditions qui ont paru les plus convenables pour obtenir les meilleurs effets :

1° Plus le galvanomètre est sensible, mieux les effets sont manifestes. Un instrument tel que les construit M. Ruhmkorff, ayant un fil de 3000 tours, peut parfaitement servir; cependant un appareil qui est construit avec un fil plus long, renfermant de 20 à 25 mille tours, donne de meilleurs résultats. Les expériences ont été faites successivement avec plusieurs appareils de diverse sensibilité.

2° Le liquide doit être bon conducteur, et ne pas attaquer la couche impressionnable. Un mélange de 2 grammes d'acide sulfurique monohydraté et de 100 grammes d'eau a donné les effets les plus marqués.

3° Les lames d'argent doivent être sans alliage, comme nous l'avons déjà dit, et, de plus, elles doivent recevoir chacune la même préparation. Il est nécessaire, en effet, que ces lames ne soient pas polarisées, et qu'elles soient aussi identiques que possible. Malgré ces précautions, on n'évite pas une polarisation primitive qui fait que, lorsqu'après avoir monté l'appareil dans l'obscurité, on ferme pour la première fois le circuit, l'aiguille est déviée fortement dans un sens ou dans un autre. Avant de commencer les expériences, on doit alors attendre pendant six, douze, vingt-quatre et même quelquefois quarante-huit heures, que l'aiguille ait repris sa première position d'équilibre.

Afin d'éviter les pertes de temps, on a, pour chaque expérience, plusieurs paires de lames préparées toujours ensemble de la même manière, et que l'on conserve en contact l'une avec l'autre dans l'eau acidulée ; le courant initial s'anéantit peu à peu, et ensuite on se sert de ces lames pour les expériences dont il sera question plus loin.

J'ai fait usage de couches d'iodure, de bromure et de chlorure d'argent, et l'on verra dans le paragraphe suivant quels sont les effets observés dans le spectre solaire avec l'iodure déposé en couches minces comme celles que recouvrent les plaques daguerriennes; les effets électriques sont alors très-énergiques. Mais les couches épaisses des substances impressionnables donnent des effets semblables, dont la durée est plus grande et l'actinomètre peut, pendant beaucoup plus longtemps, donner des effets comparables ; sous ce rapport, la couche de sous-chlorure d'argent violet a présenté les actions les plus régulières ; d'un autre côté, comme cette substance est sensible entre les mêmes limites de réfrangibilité que la rétine, son étude peut s'appliquer aux rayons que nous pouvons percevoir. En raison de ces motifs, j'ai étudié plus spécialement la construction de l'actinomètre avec ce composé impres-

sionnable, et j'entrerai dans quelques détails sur les indications que peut donner cet appareil.

On sait que les deux procédés auxquels je me suis arrêté pour la préparation des lames d'argent recouvertes de sous-chlorure violet, sont : 1° l'immersion dans une solution étendue de bichlorure de cuivre; 2° l'action d'un courant électrique, la lame d'argent à recouvrir servant d'électrode positive dans une solution d'acide chlorhydrique étendue. (Voir chapitre IV du livre III relatif à la photographie.)

Le premier procédé donne une couche qui reçoit plus vivement les impressions colorées; le second donne des couleurs plus brillantes. J'ai fait successivement usage de ces deux modes de préparation, et j'ai abandonné le premier, à l'exclusion du second, par le motif que les effets électriques, sans être énergiques, sont de beaucoup moindre durée, comme on l'expliquera bientôt. On doit donc, pour la préparation, employer le courant provenant d'un couple à acide nitrique, de grandeur ordinaire, et attacher successivement la tige de chaque lame au fil conducteur positif; les lames sont plongées dans une solution formée par un mélange d'eau et de $\frac{1}{8}$ ou $\frac{1}{10}$ en volume d'acide chlorhydrique ordinaire. Les lames doivent être polies et parfaitement décapées sur les deux faces, comme si l'on voulait obtenir une épreuve daguerrienne. Lorsque l'on a plongé dans le liquide une tige de platine en communication avec le pôle négatif du couple, le circuit se trouve fermé, la lame d'argent noircit en prenant des teintes foncées correspondantes aux teintes des lames minces. On s'arrête au violet du quatrième ordre, et on lave à grande eau. Pour avoir une teinte homogène, on doit placer la tige négative de platine assez loin de la lame, et tourner sans cesse la lame d'argent en la tenant à la main par son appendice. En plaçant un voltamètre à eau dans le circuit, on peut estimer exactement la quantité de chlore dont on recouvre la lame.

Quand on juge que les deux lames ont reçu la même préparation, on les soumet à l'action de la chaleur, comme on l'expliquera plus tard, et afin qu'elles soient modifiées physiquement de façon à donner de bonnes impressions colorées du spectre; pour cela, on les recuit à la température de 150 à 200 degrés, jusqu'à ce qu'elles deviennent rosâtres, et alors on les attache aux deux montants en cuivre. Le recuit a aussi pour but de faire que les lames ne soient pas impressionnées en dehors des limites de réfrangibilité du rayonnement lumineux, comme cela aurait lieu sans cette action. Telles sont les précautions indis-

pensables pour pouvoir obtenir de bons résultats par suite de l'action des rayons lumineux.

Il est nécessaire de placer en avant de la face antérieure de la cuve à eau un écran **M** muni d'une ouverture longitudinale, soit verticale, soit horizontale, et dont on peut régler la dimension à volonté à l'aide d'une vis micrométrique, afin de n'éclairer qu'une portion déterminée de la surface de la lame d'argent antérieure L. On peut également, au moyen de verre noirci, empêcher que toute la lumière, même réfléchie, ne parvienne à la seconde lame qui doit rester constamment dans l'obscurité. Cependant cela n'est pas toujours nécessaire, car, en mettant une enveloppe métallique M N M′ autour de l'appareil comme l'indique, par les lignes ponctuées, la figure 51, page 131, les rayons ne viennent que par l'ouverture antérieure et ne peuvent affecter que la lame L qui est en avant.

Quand tout est ainsi disposé, si l'aiguille du galvanomètre est revenue au zéro, ou en est très-proche par suite de la destruction du courant initial que l'on observe presque toujours, on peut procéder aux expériences.

Dans ces conditions, lorsque l'appareil est dans une chambre obscure, et qu'on vient à faire tomber tout à coup les rayons solaires sur la surface entière de la lame antérieure (surface de vingt centimètres carrés), l'aiguille du galvanomètre est chassée violemment dans un sens que nous allons préciser. Si l'on intercepte la lumière, l'aiguille revient peu à peu au zéro. L'action est donc tellement vive, qu'il faut ne laisser impressionner qu'une très-petite portion de la lame par les rayons solaires directs pour avoir seulement 20 ou 30 degrés de déviation de l'aiguille du galvanomètre.

La lumière d'une bougie, placée à 1 décimètre de la cuve à eau, suffit pour faire dévier l'aiguille aimantée de 12 à 15 degrés.

La déviation, qui est constamment dans le même sens tant que les rayons lumineux frappent l'appareil, indique que la lame exposée au rayonnement prend l'électricité négative, et le liquide l'électricité positive. Si c'est l'autre lame qui est éclairée, le même effet se produit, mais l'aiguille dévie en sens inverse. Dans cette circonstance, le courant est inverse de celui qui a lieu lorsque les lames sont recouvertes d'une couche mince d'iode; dans ce dernier cas, les rayons solaires donnent lieu à une décomposition, et la lame d'argent prend l'électricité positive. Quand la couche d'iode est épaisse, l'effet est inverse,

comme on l'a vu dans le paragraphe précédent. On ne peut s'expliquer cette différence que par la modification profonde que le recuit a apportée à la matière, comme les impressions colorées l'avaient déjà indiqué. Ce qui vient le démontrer encore, c'est qu'ayant opéré avec des lames préparées à la pile et non recuites, on a eu un effet électrique inverse, la lame exposée à la lumière ayant donné l'électricité positive; mais, après les avoir fait recuire, les indications électriques ont changé de sens, et les lames éclairées ont pris l'électricité négative, comme si elles étaient attaquées par le liquide au moment de l'action de la lumière. Ces résultats, joints à la plus grande sensibilité de la matière, et à la destruction des effets qui se produiraient en dehors des rayons rouges et violets, ont fait adopter les plaques recuites dans toutes les expériences de ce genre.

Lorsque la lumière diffuse, ou bien la lumière solaire, impressionne la lame, on a une déviation plus ou moins forte qui demeure constante tant que la lumière conserve la même intensité, et que la surface est suffisamment impressionnable. Si l'on vient à intercepter la lumière, l'aiguille aimantée du galvanomètre revient au zéro, le dépasse un peu en sens inverse, par suite probablement d'un courant secondaire, mais reprend bientôt sa première position d'équilibre. Si la lumière a conservé son intensité primitive, et qu'on éclaire de nouveau la lame, alors l'effet électrique est le même que précédemment.

La déviation n'est constante, on le pense bien, que tant que la surface conserve la même impressionabilité, et les résultats ne peuvent être comparables qu'autant que l'on remplit cette condition. Aussi est-il nécessaire de donner une épaisseur assez forte à la couche sensible.

J'ai reconnu, comme je l'ai dit précédemment, que, lorsque la lame impressionnable est préparée par une immersion rapide dans le bichlorure de cuivre, puis recuite, elle blanchit rapidement sous l'influence des rayons solaires ou des rayons émanés d'une lampe, et, quelques minutes après, sous la même intensité lumineuse elle donne un courant électrique beaucoup plus faible. Mais, quand elle est recouverte par la pile d'une couche épaisse impressionnable, et recuite dans les mêmes conditions, le courant est constant pendant un temps assez long. Je citerai, à cette occasion, l'expérience suivante :

On a placé à 50 centimètres de distance de la lame antérieure de l'appareil une forte lampe Carcel, dont la lumière, réfractée par une lentille, venait tomber sur la lame. L'aiguille du galvanomètre, dans sa

position d'équilibre, était à + 1 degré. Aussitôt que les rayons de la lampe tombèrent sur la lame, la déviation fut, par première impulsion, de + 16°,5, puis l'aiguille se fixa à + 14 degrés. En laissant continuer l'action, on eut, aux heures indiquées ci-après, les déviations contenues dans la seconde colonne :

Heures.	Déviations définitives.
$8^h 40^m$	14°
9 40	16
10 0	14
11 30	13

A ce moment on retourna la lame; la partie qui n'avait pas été impressionnée, étant à son tour exposée à la lumière, donna 13 degrés de déviation.

Un écran ayant intercepté la lumière à $11^h 30^m$, l'aiguille revint à + 1 degré. Ainsi, le courant électrique a conservé sensiblement la même intensité par une action continue des rayons de la lampe pendant trois heures. Les faibles variations peuvent se rapporter aux changements de température du liquide de la cuve à eau qu'il faut avoir soin d'éviter dans les expériences de ce genre.

La lumière solaire donne lieu aux mêmes effets, mais avec plus d'énergie; il est donc nécessaire de modérer l'intensité lumineuse qui, sans cela, impressionnerait trop vivement la lame, et ferait diminuer plus rapidement l'intensité du courant électrique.

Il est évident, d'après ces expériences, que, lorsque l'on ne fait agir la lumière sur la lame que pendant une minute ou deux, de façon à avoir seulement la déviation définitive de l'aiguille du galvanomètre, et qu'on soustrait ensuite la lame impressionnable à l'action des rayons, on peut conserver, pendant au moins un jour, la même sensibilité à l'appareil, et faire un grand nombre d'expériences comparatives capables d'indiquer si l'intensité de la source lumineuse a changé.

Les déviations de l'aiguille aimantée, ou du moins les intensités du courant électrique, ne peuvent être considérées comme proportionnelles à l'intensité de l'action chimique exercée sur la substance et par conséquent à l'intensité lumineuse active; elles indiquent seulement si cette intensité lumineuse est plus grande ou plus petite, dans une circonstance que dans une autre. On verra, dans le dernier paragraphe de ce

chapitre, page 144, comment on pourrait se servir de cet appareil pour comparer entre elles les intensités lumineuses.

§ 3. *Effets électriques dus à l'action des rayons différemment réfrangibles sur l'iodure d'argent et le sous-chlorure d'argent violet.*

L'actinomètre que l'on vient de décrire peut mettre en évidence l'action exercée par les rayons solaires différemment réfrangibles sur diverses substances impressionnables recouvrant les lames d'argent, car les effets sont comparables pendant un temps assez long, si l'on observe les précautions indiquées plus haut.

Pour ne laisser pénétrer sur la lame qu'une portion bien déterminée du spectre solaire, on a placé, en avant de la cuve à eau, fig. 51, un écran muni d'une fente verticale de $2^{mm},5$ d'ouverture, de sorte que la portion impressionnée de la lame se trouvait bornée à un rectangle de $2^{mm},5$ de base sur 5 centimètres de hauteur.

On a formé un spectre bien épuré, en faisant pénétrer les rayons solaires réfléchis par un héliostat à travers une fente mince et verticale du volet de la chambre obscure, et en les réfractant dans un prisme de flint. Derrière ce prisme, situé à 1 mètre du volet, se trouvait une lentille de $0^{m},60$ de foyer, qui a donné, à une certaine distance, un spectre avec toutes ses raies. Le spectre à l'aide duquel on a agi avait à peu près 3 centimètres et demi de largeur dans la direction parallèle aux raies, et 10 à 11 centimètres de longueur, depuis la raie A jusqu'à H, ses dimensions ayant varié un peu dans chaque série d'opérations. Il résulte de là qu'à chaque expérience, un quarantième de la longueur du spectre tombait sur la partie de la lame impressionnable qui devait être influencée par le rayonnement lumineux.

La cuve à eau était disposée sur un chariot, et se déplaçait au moyen d'une vis micrométrique le long d'une règle divisée parallèlement à la longueur du spectre; on pouvait donc apprécier, à chaque instant, la position de l'appareil. Par une expérience préliminaire, on déterminait directement à quelles divisions de la règle se trouvait l'appareil, quand les raies principales du spectre D, E, F, G se présentaient au milieu de l'ouverture de l'écran placé devant la cuve; ensuite, à l'aide d'un calcul fort simple, on en déduisait les positions des autres raies ou des autres parties du spectre. Chaque fois qu'on arrêtait l'appareil dans une position déterminée, l'effet produit correspondait donc à une

partie du spectre égale à $\frac{1}{40}$ de sa longueur, et, par conséquent, il y avait empiétement des parties voisines, puisque la plaque était également impressionnée par les rayons qui étaient à droite et à gauche de ceux dont la position se trouvait indiquée par le centre de l'ouverture; cet effet serait d'autant moindre que la largeur de l'ouverture serait plus petite, mais, pour avoir des effets d'une certaine intensité, on est obligé de ne pas trop la diminuer; on voit néanmoins quelle est l'approximation à laquelle on peut arriver.

On a fait ainsi différentes séries d'expériences, en opérant avec les lames recouvertes d'iodure d'argent en couches minces, et avec les lames recouvertes de sous-chlorure d'argent violet, préparé comme on l'a indiqué dans le paragraphe précédent. On a cherché les déviations du galvanomètre, mais en s'arrangeant pour qu'elles ne dépassent pas 20 à 25°, afin que les intensités des courants produits soient toujours proportionnelles aux déviations observées. Les indications, comme on l'a dit plus haut, donnent les effets plus ou moins intenses et permettent de connaître la position des maxima d'intensité ainsi que les limites d'action de la lumière sur les lames; mais il n'est pas démontré que les intensités des rayons actifs soient proportionnelles aux intensités du courant électrique produit.

Les expériences suivantes ont été faites à l'aide d'une plaque d'argent iodurée : supposons l'aiguille du galvanomètre fixe, le spectre solaire également fixe, un écran opaque placé devant la lame iodurée et la cuve à eau au-delà des rayons rouges; si l'on fait mouvoir la cuve à eau au moyen de la vis micrométrique jusqu'au moment où l'on est dans le rouge vers la raie A, qu'on arrête la cuve, qu'on enlève l'écran opaque, alors les rayons de l'extrême rouge frappent la lame et on ne voit aucune déviation dans le galvanomètre; on remet l'écran, on fait avancer un peu l'appareil et on l'arrête vers la raie B dans l'orangé, on ôte de nouveau l'écran, et, la lame étant frappée par les rayons orangés, on ne voit pas encore l'aiguille du galvanomètre se dévier. En continuant ainsi, on ne parvient à distinguer une action que lorsque les rayons du commencement du bleu, vers F, frappent la lame. Quelquefois, on a bien faible action dans le vert et le jaune, mais probablement, comme on le verra plus loin, en raison d'une impression primitive de la lame par la lumière diffuse.

Lorsque les rayons bleus frappent la lame, on reconnaît, par la déviation de l'aiguille, une action assez marquée qui va en augmentant à

mesure que l'on approche du violet. Le maximum d'effet est atteint entre G et H, et dans cette région, on peut même avoir 20 ou 30° de déviation et même davantage suivant la préparation de la lame et la sensibilité du galvanomètre. Au-delà de H, l'action décroît jusque vers P, au-delà du violet; plus loin, il n'y a plus d'effet appréciable.

Il est indispensable, après chaque observation, de replacer l'écran opaque devant la lame, et de ne laisser cette lame découverte que pendant quelques secondes, c'est-à-dire pendant le temps nécessaire pour estimer la déviation de l'aiguille du galvanomètre; alors on remet l'écran et on fait avancer plus loin l'appareil. Il faut agir ainsi afin que la lame ne soit pas trop impressionnée et qu'elle puisse présenter les mêmes résultats, dans des circonstances semblables, pendant toute la durée d'une série d'expériences.

Si l'on fait revenir la cuve à eau en sens inverse, on repasse dans toutes les parties du spectre solaire, mais en entrant par l'extrémité la plus réfrangible ou violette; alors, on retrouve successivement dans les rayons situés depuis P jusqu'en F, au commencement du bleu, les mêmes déviations pour les mêmes positions de l'actinomètre, à moins que l'intensité lumineuse n'ait changé; mais, quand on a choisi un ciel pur, les observations se font très-rapidement et l'on peut éviter cette cause d'erreur. En avançant dans le vert, près de E, on observe alors des effets plus marqués que précédemment dans ces mêmes rayons, et on trouve maintenant une action dans le jaune, l'orangé et le rouge, là où primitivement il n'y en avait aucune, et, au-delà de A, on ne distingue plus aucun effet; de sorte que entre F et A on reconnaît une partie active d'une certaine étude dont le maximum paraît être entre D et E.

Voilà donc un effet qui se manifeste dans la partie la moins réfrangible du spectre où, précédemment, il ne s'en était manifesté aucun. Cela vient de ce que, lors du premier passage de la lame dans l'image prismatique, l'iodure n'avait pas été impressionné, et que, dans le retour en sens contraire, ayant été soumis à l'action des rayons les plus réfrangibles, cet iodure devient impressionnable par la partie la moins réfrangible, en donnant lieu aux effets de continuation dont on a déjà parlé antérieurement pages 76, 83 et suivantes.

Si l'on expose de nouveau la lame dans la partie violette du spectre, qu'ensuite on la transporte dans les rayons les moins réfrangibles, on observe, pour les mêmes positions de l'actinomètre, des déviations plus considérables que la seconde fois, tandis que dans les rayons les plus

réfrangibles on retrouve les mêmes nombres de degrés de déviation. Une nouvelle exposition de la lame dans les diverses parties du spectre donne les mêmes résultats, c'est-à-dire qu'à mesure que la lame est plus impressionnée, l'action des rayons les moins réfrangibles ou agissant comme continuant une action commencée, est plus intense, tandis que celle des rayons les plus réfrangibles reste la même (1).

Cette augmentation d'action des rayons entre les lignes A et F va jusqu'à une certaine limite, de sorte que l'action maximum des rayons les moins réfrangibles ne dépasse guère l'action maximum des rayons excitateurs ou les plus réfrangibles.

Il faut avoir soin, ainsi qu'on l'a déjà dit plus haut, que dans chaque expérience la portion de la lame qui est derrière l'écran ne reste exposée dans la partie du spectre que l'on explore que pendant le temps nécessaire à l'observation de la déviation de l'aiguille aimantée, car alors la même lame exposée un grand nombre de fois dans les mêmes conditions d'éclairement, donne sensiblement lieu à la même déviation. Ce n'est qu'après avoir été très-fortement impressionnée qu'elle ne donne plus un courant électrique de même intensité.

On voit qu'à l'aide de ces effets, on retrouve la même action que celle qui avait été obtenue par le changement de teinte de l'iodure d'argent, pages 76, 83 et suivantes, et on reconnaît qu'il y a pour ainsi dire deux parties actives du spectre : l'une, située dans la partie la plus réfrangible du spectre solaire, a son maximum entre G et H, se termine d'un côté en F et de l'autre en P, et agit toujours avec la même intensité; l'autre est située depuis F jusqu'en A, a son maximum entre D et E, n'agit que sur l'iodure déjà impressionné, et a une action d'autant plus intense que la substance est plus impressionnée, jusqu'à ce que l'effet maximum qu'elle peut produire atteigne à peu près la valeur du maximum d'effet de la première partie.

On doit remarquer qu'il n'y a pas d'action inverse dans l'extrême rouge et en dehors du rouge, ou du moins que le courant électrique produit ne change pas de sens; il faut en conclure que le phénomène curieux observé lors de la coloration des papiers sensitifs, ainsi que de la fixation de la

(1) Ce résultat explique pourquoi, lorsque l'on continue, à l'aide des verres colorés en rouge ou en jaune, une image obtenue sur l'iodure d'argent, mais seulement commencée à la chambre obscure, cette image vient avec le même décroissement de lumière que l'on aurait obtenu en laissant la lame exposée plus longtemps à la chambre obscure ; car les rayons qui traversent ces verres réagissent d'autant plus fortement sur les lames que certaines parties de l'iodure ont été plus impressionnées.

vapeur de mercure, et qui a été signalée comme action négative, comme on l'a vu page 92, ne correspond pas à un changement dans la direction du courant électrique. On doit observer toutefois que, dans les expériences faites antérieurement par l'apparition des images, on opère dans l'air; ici on opère dans l'eau, et il est possible que ce changement de milieu influe sur l'effet particulier qui se produit à l'extrême rouge; c'est un sujet qui mérite d'être étudié.

J'ai fait plusieurs séries d'expériences analogues aux précédentes en substituant aux lames d'argent iodurées des lames recouvertes de sous-chlorure d'argent violet, préalablement recuit, ainsi qu'on l'a dit dans le paragraphe précédent; j'ai même employé, à la place des lames, des fils d'argent bien décapés et recouverts de sous-chlorure, de sorte qu'une partie de la surface cylindrique du fil antérieur était seule impressionnée et que la surface exposée à l'influence lumineuse était très-étroite; les résultats ont été les mêmes qu'avec les lames.

En plaçant successivement l'actinomètre dans les différentes parties du spectre, on n'a eu d'effet sensible qu'entre les limites des réfrangibilités A et H; en dehors du rouge et au-delà du violet, il n'y a pas eu de courant produit. Quant au maximum d'action, il s'est trouvé sensiblement à la même place que celui des rayons les moins réfrangibles qui continuent à impressionner l'iodure d'argent, c'est-à-dire dans le vert.

Le tableau suivant donne, en résumé, les intensités du courant observé avec des lames iodurées ou recouvertes de sous-chlorure placées successivement dans un spectre formé avec un prisme de flint blanc. On n'a représenté que le rapport des intensités électriques observées à celle du maximum avec chaque substance, et l'on a supposé que dans chaque cas cette action maximum était égale à 100; on se rappelle qu'avec l'iodure d'argent suffisamment impressionné les deux maxima arrivent à être égaux. On y a joint les intensités lumineuses déterminées dans chaque région du spectre par Fraünhoffer, intensités qui se rapportent à des rayons de toutes couleurs et qui, pour ce motif, ne sauraient avoir la précision des déterminations faites en comparant des rayons de même nuance :

SPECTRE SOLAIRE.		Intensité lumineuse. (1).	INTENSITÉ ÉLECTRIQUE OBTENUE	
Couleurs principales.	Raies principales		Avec l'iodure d'argent déjà impressionné.	Avec le sous-chlorure d'argent violet.
Rouge extrême.	A	insensible.	5	à peine sensible.
Rouge orangé.	B	3,2	20	20
—	C	9,4	32	35
Jaune.	D	64,0	68	75
Vert.	»	100 { maxim. à peu près à 0,3 de D E à partir de D. }	»	»
—	»	»	100 { Maximum à 0,6 de la distance D E à partir de D. }	100 max. à 0,6 de D E.
—	E	48,0	75	85 à 90 ?
Commencement du bleu.	F	17,0	25	73
»	»	»	20 { Minim. près de F entre F et G }	»
Bleu indigo.	G	3,1	65	19
»	»	»	100 { Max. à peu près à 0,4 de G H à partir de G. }	»
Violet extrême.	H	0,6	72	à peine sensible.
»	I	»	40	»
»	M	»	27	»
»	N	»	17	»
»	O	»	13	»
»	P	»	5	»
»	»	»	»	»

Quoique les intensités des courants électriques ne puissent servir à mesurer l'intensité des rayons actifs, on peut, à l'aide de leur comparaison, juger de la position des maxima et des minima d'action et connaître l'étendue des parties actives de l'image prismatique sur les deux substances impressionnables qui recouvrent les lames d'argent. Il est facile, pour mieux se représenter les phénomènes, de figurer graphiquement les courbes d'intensités des courants électriques et celle de l'intensité lumineuse.

Dans la figure 52, représentée ici, la ligne horizontale A H P représente les positions des différentes parties du spectre obtenu avec un prisme de flint. Les lettres B, C, D, H, etc., correspondent aux raies noires qui portent leur nom. Les ordonnées ont été supposées proportionnelles aux nombres inscrits dans le tableau précédent; le maximum a été pris

(1) Les nombres compris dans cette colonne sont extraits du mémoire de Fraünhoffer cité 1er volume, page 130.

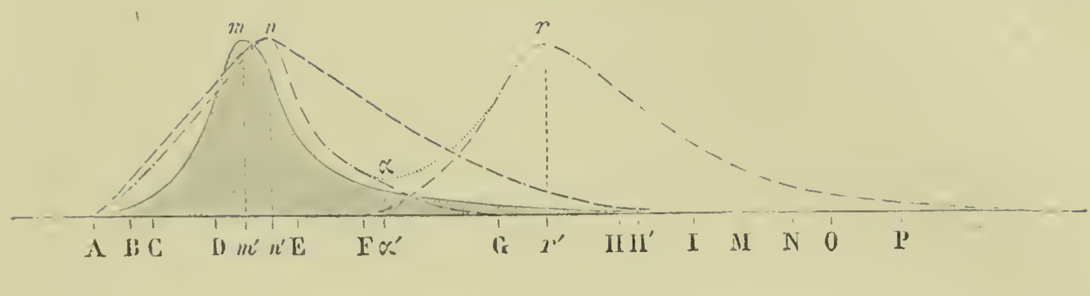


Fig. 52.

arbitrairement et l'on a admis, pour plus de simplicité, que pour l'intensité lumineuse l'ordonnée mm', correspondant à ce maximum, a la même valeur que les ordonnées nn', rr' qui sont relatives aux déviations du galvanomètre. AmH figure la courbe des intensités lumineuses; la ligne AnH, représentée par des traits interrompus, celle des intensités électriques lorsque l'actinomètre a pour substance active le sous-chlorure d'argent; et A n α r P, la courbe des intensités électriques quand on se sert de l'iodure d'argent déjà impressionné; cette dernière ligne est formée de points et de traits alternants ensemble. Comme on l'a vu plus haut, les maxima des parties les moins réfrangibles sont sensiblement à la même place en nn'.

La courbe relative à l'iodure d'argent offre deux maxima d'intensité et un minimum en αα'. Si la lame n'a pas été impressionnée, la courbe FrP donne la position de la partie active; si la lame a été impressionnée, alors il vient s'ajouter la courbe An α G.

Les expériences de Fraünhoffer, sur la mesure des intensités lumineuses du spectre, placent le maximum de lumière près de D. Si les effets accusés par l'actinomètre sont d'autant plus énergiques que la lumière est plus intense, ils indiqueraient donc pour maximum, dans le cas du sous-chlorure violet, une région plus éloignée de D et plus près de E. On ne pourra être fixé sur la position exacte du maximum d'intensité lumineuse, que lorsque, à l'aide d'un procédé photométrique permettant de comparer des lumières de nuances différentes, on aura déterminé les intensités lumineuses des différentes parties du spectre. Jusqu'à présent, on ne peut donc pas se prononcer sur la coïncidence ou la non-coïncidence de la position du maximum d'action sur la matière sensible qui reproduit les couleurs naturelles des corps et de celle du maximum de lumière; néanmoins, ils diffèrent peu. D'un autre côté, les courbes A m H et An H ne sont pas semblables; mais, pour faire la comparaison d'une manière précise, il faudrait que l'on pût

évaluer la quantité d'effet chimique produit et non pas l'intensité d'un courant qui n'en peut donner la mesure immédiate.

§ 4. *Comparaison entre l'intensité lumineuse active et l'intensité du courant électrique produit lors de l'altération du sous-chlorure d'argent.*

On a pu voir, dans les paragraphes précédents, que les lames d'argent recouvertes de sous-chlorure chromatiquement impressionnable, et préparées convenablement, donnent lieu à des effets électriques toutes les fois que les rayons émanés du soleil ou d'une source artificielle viennent les frapper; ces surfaces sont sensibles, comme on l'a vu, entre les mêmes limites de réfrangibilité que la rétine. Si l'on remarque, en outre, qu'en donnant à la couche impressionnable une épaisseur convenable, on obtient un courant électrique dont l'intensité reste la même pendant un temps plus ou moins long lorsque l'intensité lumineuse est constante, on pourra concevoir la possibilité de se servir de ces phénomènes pour comparer, dans quelques circonstances, l'intensité de la lumière. Il faudrait, pour que l'appareil pût servir de photomètre, que la courbe des intensités chimiques sur cette matière fût la même que celle des intensités lumineuses, quand on compare les actions exercées dans les différentes parties du spectre solaire; il est possible qu'il en soit ainsi, mais on a vu dans le paragraphe précédent que les résultats obtenus ne permettaient pas de le démontrer. En tout cas, relativement aux rayons actifs sur cette matière, l'emploi de l'actinomètre électro-chimique est analogue à celui de la pile thermo-électrique pour les rayons calorifiques.

On doit examiner d'abord, comment le courant électrique varie lorsque l'intensité lumineuse change. On pourrait former une table des intensités du courant électrique; mais ce procédé, pour le cas actuel, ne me paraît pas susceptible d'une grande précision. J'ai placé alors, en avant de la cuve à eau contenant les lames sensibles de l'actinomètre, un écran à ouverture variable; cette ouverture était large de 4 centimètres et sa hauteur variait depuis 0 jusqu'à 4 centimètres. On a pu atteindre ce but, en rendant mobile une lame de cuivre, à bords bien dressés, à l'aide d'une vis micrométrique à tête divisée. Ce procédé permet de mesurer, à un centième de millimètre près, la hauteur de l'ouverture variable de l'écran.

Cela fait, on a mis l'appareil actinométrique sur un petit chariot,

comme dans les expériences précédentes, ce chariot pouvant s'approcher ou s'éloigner le long d'une règle divisée. On a disposé cette règle de façon à ce que les rayons solaires réfléchis sur un héliostat pénètrent dans la chambre obscure parallèlement à la règle, et viennent frapper la lame impressionnable quand il n'y a aucun écran interposé entre le volet et l'instrument. Une fois ces premières dispositions prises, on a placé sur le trajet du faisceau lumineux une lentille à court foyer, à l'aide de laquelle les rayons se réfractent, et vont en divergeant à partir du foyer de la lentille. On conçoit donc qu'en recevant la lumière à des distances connues de ce foyer, ce qui est facile à l'aide de la règle divisée, on puisse, par un calcul fort simple, connaître les rapports d'intensité lumineuse des rayons actifs. Si la lentille est à court foyer, on peut, en ne considérant que des distances supérieures à 20 ou 30 centimètres, regarder le foyer lumineux comme un point, et alors les intensités lumineuses sont en raison inverse des carrés des distances de l'appareil au foyer de la lentille.

Le procédé suivi dans la série d'expériences ci-après mentionnée consiste à diminuer ou à augmenter l'ouverture de l'écran à l'aide de la vis micrométrique, c'est-à-dire à augmenter ou à diminuer l'étendue de la surface impressionnée suivant des quantités connues, de façon à ce que la déviation du galvanomètre reste constante. En prenant 30 degrés pour cette déviation constante, on a eu les résultats suivants :

Distance de la lame au foyer de la lentille. Centimètres.	Rapport I, des intensités lumineuses.	Largeur II, de l'ouverture de l'écran.	Produit I. II.
20	1	8,10	8,10
30	0,444	12,26	5,44
40	0,250	19,40	4,85
50	0,160	26,51	4,24
60	0,111	32,00	3,55

On voit qu'il n'y a aucun rapport simple entre l'intensité lumineuse et l'étendue que l'on doit donner à une lame pour obtenir le même courant électrique, le produit de l'intensité lumineuse par la hauteur de l'ouverture qui représente un nombre proportionnel à la surface n'étant pas constant. Ainsi, une surface chimiquement sensible d'une étendue double, impressionnée par un faisceau de rayons lumineux d'une intensité moitié

moindre, ne donne pas lieu à un courant électrique de même intensité, mais à un courant plus énergique. On ne peut donc pas se servir de la mesure de l'étendue de la surface impressionnée pour comparer immédiatement les intensités lumineuses actives. Il est possible qu'il existe une relation entre ces deux expressions, mais je n'en ai pas trouvé de simple pouvant s'appliquer entre des limites très-différentes d'intensité.

L'expérience suivante conduit également à la même conclusion : on a mis l'appareil à une distance telle, que la lame était à 30 centimètres du foyer de la lentille. Pour maintenir la déviation de l'aiguille aimantée à + 29 degrés, il a fallu ouvrir l'écran mobile de 17 millimètres. On a alors augmenté l'ouverture de l'écran : avec 32 millimètres d'ouverture, l'aiguille du galvanomètre s'est déviée de 73 degrés; mais en éloignant l'appareil le long de la règle divisée l'aiguille aimantée s'est rapprochée de zéro ; pour qu'elle se maintînt à + 29 degrés, il a fallu s'arrêter à 441 millimètres du foyer de la lentille.

Le rapport des intensités lumineuses, dans cette expérience, est de $\left(\frac{44,1}{30}\right)^2 = 2,15$. Dans le premier cas le rapport des surfaces impressionnées est $\frac{32}{17} = 1,88$.

Les résultats obtenus avec une lampe n'ont conduit également à aucune proportionnalité entre les intensités lumineuses et les surfaces impressionnables. Au lieu de se servir d'un cône de rayons divergents, il serait intéressant de faire des expériences analogues au moyen de la lumière polarisée et en faisant varier les intensités lumineuses à l'aide de prismes bi-réfringents.

On peut néanmoins faire usage de l'actinomètre pour comparer les intensités lumineuses d'un même faisceau de rayons ou de faisceaux différents ; il suffit pour cela que l'on opère toujours sur la même étendue de substance impressionnable ou sur la même lame sensible, et que l'on fasse varier, d'après un procédé connu, l'intensité du faisceau de rayons actifs jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre indique toujours la même déviation. Le moyen le plus simple pour atteindre ce but consisterait à projeter, avec une lentille, les rayons lumineux sur une étendue constante de la lame antérieure de l'actinomètre, et, à l'aide d'une ouverture à bords mobiles placée sur la route des rayons rendus parallèles, à faire varier la largeur du faisceau incident et par conséquent l'intensité de ce

faisceau, qui agirait toujours sur la même surface. L'appareil, dont on peut augmenter beaucoup la sensibilité en le mettant en rapport avec un galvanomètre suffisamment délicat, servirait donc à constater le moment où chaque faisceau aurait la même intensité d'action. C'est de cette manière que l'on devrait opérer, et l'actinomètre électrochimique pourrait alors être employé comme un photomètre.

CHAPITRE IV.

Comparaison entre les intensités des rayons de diverses sources lumineuses agissant sur les substances impressionnables. Extinction des rayons actifs.

§ 1er. *Méthodes de comparaison.*

Chaque substance chimiquement impressionnable est sensible entre des limites différentes de réfrangibilité et a pour ainsi dire son spectre d'action, de sorte que deux sources lumineuses, ou deux faisceaux de rayons inégalement réfrangibles, produisent des effets très-divers suivant la nature des corps impressionnés. Ainsi, considérons un faisceau de lumière verte et un faisceau de rayons ultra-violets : le premier pourrait produire un effet très-énergique sur le sous-chlorure d'argent et sur la rétine, tandis que le second serait presque sans action; le premier donnerait une coloration à une feuille de papier, recouverte d'acide chromique, coloration qui serait moins vive avec l'autre faisceau ; cette lumière verte ne produirait aucun effet sur la résine de gaïac ni sur le chlorure d'argent, tandis que l'action de la lumière violette serait à son maximum sur ces deux substances ; de sorte que les comparaisons que l'on peut effectuer, en se servant de telle ou telle substance, doivent être considérées comme particulières à cette substance, ou du moins aux matières qui sont influencées comme elle. Ces résultats expliquent pourquoi les effets de la lumière diffuse peuvent être différents sur les corps impressionnables et sur la rétine, car des rayons ultra-violets peuvent manquer sans que l'intensité des rayons visibles paraisse différente.

On pourrait se servir d'une des réactions produites sous l'influence de la lumière et dont il a été question dans le premier chapitre de ce livre, pour étudier l'intensité des rayons actifs, mais pourvu que la quantité d'action chimique puisse être appréciée. On a fait usage, soit des phénomènes de coloration, soit de la mesure du volume d'un gaz dégagé, soit du poids d'un sel insoluble ou d'un précipité formé, c'est-à-dire d'une action chimique définie.

On a fréquemment employé la coloration d'une feuille de papier recouverte d'un sel d'argent, coloration qui est plus ou moins vive suivant l'intensité des rayons qui ont agi pendant le même temps, ou bien suivant la plus ou moins grande durée de l'action des rayons, en supposant qu'ils aient conservé la même intensité. Pour connaître le degré de coloration de la matière sensible, on a formé une échelle de tons au moyen d'un certain nombre de bandes de papier que l'on a colorées avec des nuances de plus en plus foncées, reproduisant les différentes teintes que prend le papier sensible quand il est exposé à l'action continue de la lumière; en approchant alors le papier impressionné de la surface sur laquelle se trouve l'échelle colorée, on juge du plus ou moins d'altération de la substance.

Pour que cette méthode puisse donner des résultats comparables entre eux, il est nécessaire que le papier photographique soit préparé toujours de la même manière, et ait toujours à peu près le même degré d'hygroscopicité ; sans cela, dans les mêmes conditions il pourrait être plus ou moins sensible. Mais, en admettant qu'il se trouve toujours dans le même état physique, il est aisé de comprendre que surtout en faisant usage des papiers ordinaires de chlorure, de bromure ou d'iodure d'argent, on ne peut avoir que des indications en plus ou en moins sur l'effet chimique de la lumière, et non pas des déterminations d'intensité comparatives. On pourrait, par exemple, chercher dans chaque circonstance quel est le temps nécessaire pour que chaque papier impressionnable donnât la même teinte; mais l'action a-t-elle lieu proportionnellement au temps? Si la combinaison du chlore et de l'hydrogène paraît se faire dans ces conditions, comme on va le voir plus loin, l'action sur les papiers impressionnables préparés avec des sels d'argent conduit à des résultats opposés, puisque l'on a vu dans les chapitres I et II que si la partie la plus réfrangible du spectre agit à peu près avec la même intensité dans les mêmes circonstances, la partie la moins réfrangible au contraire agit d'autant plus vivement que la substance a été im-

pressionnée davantage. D'un autre côté, la partie extrême du rouge peut, en agissant simultanément avec les autres parties du spectre, diminuer l'effet de celles-ci. On voit que l'on ne doit demander à cette méthode que des indications sur les effets plus ou moins énergiques produits dans un temps donné, ainsi que l'observation du maximum d'action pendant une période déterminée.

On peut citer comme se rapportant à ce sujet les expériences de M. Malaguti (1), dont on a parlé antérieurement page 102, ainsi que les dispositions nombreuses proposées depuis et fondées sur les effets de coloration des papiers impressionnables.

M. Claudet (2) a indiqué une disposition au moyen de laquelle on peut évaluer le temps nécessaire pour que la lumière donne une impression d'une intensité déterminée sur une surface sensible; il a nommé photographomètre l'appareil qu'il avait ainsi disposé.

M. Pouillet (3) a montré que l'on pouvait utiliser l'action exercée par les rayons solaires sur les papiers photographiques préparés avec des sels d'argent, pour marquer les instants de la journée auxquels le soleil se montre ou se cache et la durée de ses apparitions ou disparitions. Dans l'appareil qu'il a construit pour cet usage, il ne compare pas entre eux les effets produits sur la matière sensible, et celle-ci n'est pas influencée par la lumière diffuse; elle n'est colorée que par les rayons solaires directs qui viennent la frapper.

Il y a certaines réactions chimiques opérées sous l'influence de la lumière et qui donnent lieu, comme résultat final, à un dégagement de gaz. Telle est l'action exercée sur l'eau chlorée et celle qui peut se produire en mélangeant de l'acide oxalique avec un sel de peroxyde de fer; dans le premier cas il y a dégagement d'oxygène, et dans le second cas on observe un dégagement d'acide carbonique dû à la décomposition de l'oxalate de peroxyde de fer.

L'action de la lumière sur l'eau chlorée est un phénomène complexe en raison de ce que le chlore se porte sur l'hydrogène et sur une partie de l'oxygène de l'eau, et qu'il est difficile de tenir compte de la proportion de gaz qui peut rester en dissolution (4).

M. Draper, comme on l'a déjà dit antérieurement, page 72, a reconnu

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, 2e série., t. 72, p. 5.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 27, p. 370.

(3) *Id.*, t. 42, p. 913, 1856.

(4) Voir les mémoires de MM. Wittwer et Bunsen et Roscoe, *Ann. de Poggend*, t. 94, p. 597, t. 96, p. 373, et t. 97, p. 304.

qu'une dissolution d'oxalate de peroxyde de fer peut être conservée dans l'obscurité sans changement; mais que dès qu'on l'expose à la lumière du jour ou d'une lampe elle se décompose avec dégagement de gaz acide carbonique et précipitation d'un sel ferrugineux; il a donc proposé cette réaction pour comparer les intensités de l'action chimique exercée par la lumière. La difficulté de l'emploi de cette méthode consiste à évaluer la proportion d'acide carbonique qui reste en dissolution dans le liquide, car celui-ci doit se saturer de gaz avant qu'aucun dégagement n'ait lieu; l'auteur a fait usage, pour cela, soit de l'élévation de température du liquide après l'insolation, soit d'un courant de gaz hydrogène.

Ces motifs ont engagé M. Draper à doser le sel de protoxyde de fer provenant de l'action lumineuse sur l'oxalade de peroxyde, au lieu d'évaluer la proportion de gaz produit : ayant remarqué que la solution mêlée à du chlorure d'or ne donne lieu à aucune réaction, mais que la plus faible trace de lumière produit une précipitation de métal, il a comparé les intensités des effets produits par la lumière diffuse à des heures et à des jours différents, par le poids de l'or précipité pendant un temps déterminé, dans un volume également déterminé.

On peut employer la réaction que j'ai indiquée page 69, et d'après laquelle au milieu d'une masse liquide formée par un mélange d'acide oxalique et de bichlorure de mercure il se produit une précipitation de protochlorure de mercure sous l'influence de la lumière. Les proportions du mélange sont pour 100 gr. d'eau, 6 gr. 5 de bichlorure de mercure et 12 gr. 5 d'acide oxalique; la dissolution est alors complète. Lorsque l'insolatino a lieu, le protochlorure de mercure se précipite et il ne reste plus de ce sel en dissolution; la seule précaution à prendre consiste à filtrer la liqueur et à peser le protochlorure.

J'ai fait quelques séries d'expériences pour connaître quelle était l'influence du temps sur la quantité d'action chimique produite : pour cela, un certain nombre de flacons semblables ont été exposés à la lumière solaire avec un même poids de la même dissolution, et l'on a laissé l'un deux minutes l'autre quatre, une autre six, etc., de façon à avoir cinq ou six flacons exposés à la fois; on a opéré également en les retirant de cinq minutes en cinq minutes ou de quart d'heure en quart d'heure. Il m'a semblé que les résultats d'une même série d'expériences pouvaient assez bien être représentés par la formule,

$$P = C\left(1 - \frac{1}{e^{at}}\right)$$

dans laquelle P est le poids du protochlorure précipité, t le temps d'exposition à la lumière, C une constante représentant le poids total de protochlorure qui peut être précipité de la dissolution après un temps très-long, e et a deux coefficients constants.

Les expériences n'ont pas été assez nombreuses, ni faites absolument dans les mêmes conditions d'intensité lumineuse pour que je puisse affirmer cette loi ; je n'ai pu également bien mettre en évidence si la réaction, lente dans les premiers instants de l'influence lumineuse, s'accélère comme on en a des exemples et ainsi qu'il sera dit plus loin ; il aurait fallu que j'eusse opéré dans une chambre noire avec un faisceau de rayons solaires de même intensité, ce que je n'ai pu faire jusqu'ici ; c'est du reste un sujet qui mérite d'être étudié. J'ai insisté sur cette réaction, car elle se produit au milieu d'une dissolution incolore, et les rayons qui sont compris entre les réfrangibilités A et H du spectre solaire sont absorbés dans les mêmes proportions ; l'action a donc lieu principalement sous l'influence des rayons ultra-violets, puisque les rayons qui agissent sur ce liquide doivent être absorbés. J'ai constaté en effet qu'un tube plein de la dissolution sensible étant exposé au soleil au milieu d'un vase rempli du même liquide ne donnait lieu qu'à une faible précipitation, due à la portion de rayons actifs qui avait pu encore traverser le mélange sans agir sur la dissolution environnante ; une plus grande épaisseur de liquide eût produit l'effet d'un écran opaque pour la réaction chimique opérée sur cette matière.

M. Draper, en 1843, avait employé le mélange de chlore et d'hydrogène, qui détone, comme on le sait, à la lumière solaire (voir p. 51), mais qui se combine lentement à la lumière d'une lampe, pour comparer les actions chimiques produites par des rayons de diverses intensités. Cette réaction est d'une sensibilité très-grande ; mais dans les expériences qu'il fit à ce sujet il ne s'occupa pas de l'inégale solubilité des gaz dans le liquide avec lequel ils étaient en contact, et dès lors on ne peut regarder comme provenant uniquement de la combinaison des deux gaz la diminution de volume observée.

MM. Bunsen et Roscoe (1) se sont servis d'un appareil fondé sur ce principe et à l'aide duquel ils ont fait un grand nombre d'observations

(1) *Annales de Poggendorf*, t. 100, p. 43. — *Id.*, p. 481. — *Id.*, t. 101, p. 235. — *Id.*, t. 108, p. 193. *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 55, p. 352. — *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle période, t. 1, p. 145, et t. 7, p. 71.

très-intéressantes, dont nous allons citer les principaux résultats.

Pour se procurer un mélange formé de volumes égaux de chlore et d'hydrogène, ils se sont servis de la décomposition électro-chimique d'une solution aqueuse d'acide chlorhydrique, en prenant pour électrodes des conducteurs en charbon que l'on avait soin de tenir toujours immergés dans le liquide à décomposer. Suivant les analyses qu'ils ont faites, le gaz qui se dégage est formé de volumes exactement égaux de chlore et d'hydrogène, et le mélange ne contenait ni oxygène ni acide hypochloreux produits soit par la décomposition de l'eau, soit par une action secondaire du chlore (1). L'acide chlorhydrique employé avait une densité égale à 1,148. Le mélange ainsi obtenu peut être abandonné à lui-même dans l'obscurité, pendant vingt-quatre heures au moins, sans qu'il se manifeste la moindre apparence de combinaison des deux gaz.

Le mélange fourni par la décomposition électro-chimique se dégageait dans une éprouvette communiquant, par la partie supérieure, à un tube laveur que suivait un tube horizontal terminé en *r* par un robinet en verre, fig. 53.

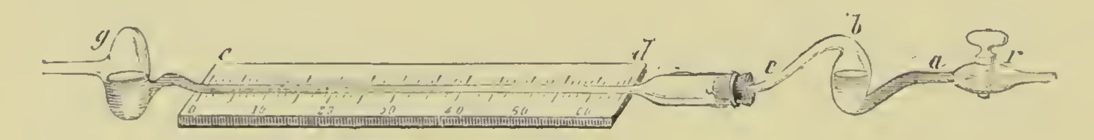


Fig. 53.

La partie essentielle de l'appareil où se faisait les mesures consiste en un tube en verre *abc*, recourbé, présentant au milieu en *b* un renflement de 7 centimètres cubes environ, à moitié plein d'eau. Le tube *abc* était suivi par un tube horizontal assez long *cde*, et communiquait à celui-ci par une partie un peu plus large *c* ; le tube horizontal *d c* était fixé sur une échelle graduée et se terminait en *g* par un second renflement où se trouvait encore de l'eau ; enfin, ce dernier renflement communiquait à un flacon condenseur par un tube en caoutchouc. Le mélange de chlore et d'hydrogène pouvait circuler dans les deux tubes *abc, cde;* dans le renflement *b* il pouvait être soumis à l'action de la lumière, et afin de limiter cette action au gaz

(1) Il faut sans doute que la dissolution d'acide chlorhydrique soit pure, car dans quelques expériences faites sur l'électrolyse de l'acide chlorhydrique du commerce à l'aide d'une intensité électrique très-puissante et des électrodes en platine, nous avons observé, M. Fremy et moi, la présence de composés chlorés.

sans qu'elle s'étendît à l'eau chlorée contenue dans le renflement, toute la partie du verre occupée par l'eau était enduite extérieurement de noir de fumée.

Pour faire une expérience, on laissait d'abord circuler dans l'appareil, pendant plusieurs jours, le mélange des deux gaz hydrogène et chlore, de manière à saturer complétement l'eau qui en occupait diverses parties; puis on fermait le robinet *r*, on notait la division du tube *de* où s'arrêtait la colonne d'eau provenant du renflement *g*, dont le niveau était supérieur à *de*, et on laissait agir le faisceau lumineux sur le renflement *b*, tout le reste de l'appareil étant dans l'obscurité. Lorsque l'expérience était terminée, le déplacement de la colonne d'eau dans le tube *de* faisait connaître le volume de gaz absorbé dans la partie *abcde*, et par conséquent la quantité du mélange qui sous l'influence de la lumière s'était transformé en acide chlorhydrique et s'était dissoute, après cette transformation, dans le renflement *ab*.

Pendant que l'expérience avait lieu, on n'arrêtait pas la décomposition électro-chimique de l'acide chlorhydrique qui avait fourni le mélange gazeux, mais on la ralentissait beaucoup en introduisant dans le circuit de la pile la résistance d'une colonne d'eau à peine acidulée. Le faible dégagement de gaz qui subsistait encore servait à maintenir la saturation du liquide de l'appareil à décomposition et de l'eau du tube laveur; l'excès de gaz s'échappait d'ailleurs par un tube de sûreté soudé en un point du tube laveur et plongeant par son extrémité dans un flacon plein d'eau, à l'aide duquel on pouvait régler la pression dans l'intérieur de l'appareil et déterminer le gaz à s'échapper soit par le robinet *r* et les tubes *abcdeg*, soit par le tube de sûreté et le flacon régulateur. Enfin, un second appareil condenseur, semblable à celui dont il a été fait mention tout à l'heure, et qui servait à absorber le gaz en excès sortant de *g*, recevait le gaz après qu'il avait traversé l'eau de ce flacon.

La lumière qui a servi aux expériences était la lumière d'un bec de gaz, concentrée sur le vase ou renflement *b* au moyen d'une lentille, et dépouillée de la plus grande partie des rayons infra-rouges en traversant une couche d'eau de plusieurs centimètres d'épaisseur.

MM. Bunsen et Roscoe se sont occupés d'abord de l'étude des circonstances qui peuvent avoir de l'influence sur les phénomènes et des conditions nécessaires pour avoir des résultats toujours comparables.

En employant un bec de gaz en platine monté sur un petit réservoir cubique et placé au milieu d'une grande boîte rectangulaire, laquelle avait sa base percée d'un grand nombre de trous, le réservoir cubique rendait l'écoulement du gaz d'éclairage parfaitement régulier et la boîte faisait disparaître toutes les oscillations dues à l'agitation de l'air extérieur. Dans une des parois de la boîte était pratiquée une ouverture circulaire, fermée par une sorte de cuve cylindrique pleine d'eau, que les rayons émis par la flamme devaient traverser avant d'agir sur le mélange de chlore et d'hydrogène. Avec cet appareil, la flamme réglée à une hauteur convenable présentait une invariabilité absolue de forme, de dimensions et d'éclat, et semblait un corps solide incandescent.

On a constaté que la constance de l'intensité chimique des rayons émis par la flamme dépend moins de la composition du gaz d'éclairage qu'on aurait dû le supposer, car les analyses du gaz ont donné des résultats variables quant à la composition, alors que les effets chimiques ont été parfaitement constants. Si la flamme est mélangée d'air de façon à ce que la combustion soit complète et qu'il n'y ait plus de carbone en excès, la puissance d'action chimique de cette flamme disparaît presque entièrement ; mais la coloration de la flamme ainsi dépourvue de carbone, par les matières salines en vapeur, peut faire varier le pouvoir d'action chimique de la lumière, comme on l'a vu chapitre II, page 117.

Le degré de concentration de la dissolution aqueuse d'acide chlorhydrique qui donne le mélange gazeux actif, et le soin que l'on prend de faire circuler pendant longtemps dans l'appareil les gaz provenant de la décomposition électro-chimique de ce liquide, avant de commencer les observations, exercent la plus grande influence sur les résultats. La dissolution doit contenir environ 30 pour 100 d'acide chlorhydrique; si la proportion descend à 23 pour 100, les gaz fournis ensuite ne peuvent plus servir à des observations comparables. Si le passage du mélange gazeux est continué pendant longtemps dans l'appareil, les effets augmentent et atteignent un maximum constant; la quantité nécessaire pour arriver à ce point est environ 6 litres de gaz.

Il résulte de là qu'il est nécessaire d'employer au moins trois jours, et même plus, pour préparer l'appareil avant de commencer les expériences. Mais l'appareil ainsi préparé peut servir pendant plusieurs mois, pourvu que l'on évite avec le plus grand soin l'entrée de l'air, et qu'à chaque renouvellement de l'acide chlorhydrique que l'on décompose électro-chimiquement, on fasse dégager les gaz par le tube de sû-

reté pendant une heure ou deux avant d'ouvrir le robinet *r*, figure 53. Le mélange de gaz absolument purs que l'on obtient, en observant toutes les précautions indiquées, est d'ailleurs extrêmement sensible à l'action du rayonnement solaire, car la lumière diffuse d'un ciel nuageux ainsi que la lumière crépusculaire même longtemps après le coucher du soleil, peut suffire à en déterminer l'explosion.

Il est nécessaire que la température des gaz soit parfaitement constante, de manière que les changements de volume dus à la dilatation ne se confondent pas avec les effets de l'action chimique. Pour satisfaire à cette condition, on avait placé l'appareil dans une chambre exactement close, et, ainsi qu'on l'a déjà dit, les rayons émanés de la flamme traversaient un écran d'eau. Quand on arrête tout à coup l'action de la lumière sur le mélange gazeux, la diminution de volume qu'éprouve ce mélange persiste encore pendant quelques secondes et d'autant plus longtemps que la lumière active a été plus intense. Mais les auteurs du travail ont attribué cet effet, qui était du reste extrêmement faible, non pas à une modification permanente communiquée par la lumière au chlore ou à l'hydrogène, mais à ce que la chaleur dégagée lors de la combinaison du gaz dans l'instant qui a précédé l'observation, avait produit une dilatation, qui se traduit après par une légère contraction due au retour à l'équilibre de température avec les corps environnants. Cet effet est très-peu marqué, car il correspondait à peine à quelques dixièmes de degré.

Lors de l'action de la source lumineuse d'intensité constante pendant un temps plus ou moins long, l'observation manifeste un fait curieux, dont il faut tenir compte dans les expériences : la combinaison du chlore et de l'hydrogène, d'abord extrêmement lente, s'accélère peu à peu, quelque constante que soit la source lumineuse employée, atteint son maximum au bout de plusieurs minutes, puis, à partir de ce moment, devient sensiblement uniforme.

Ainsi, d'après MM. Bunsen et Roscoe, il y aurait une aptitude à la combinaison qui est développée par la lumière dans un mélange gazeux, et qui est telle, qu'au bout d'un temps variable, mais assez court, l'action chimique devient constante. Cette aptitude serait passagère et non permanente, car en interrompant l'action lumineuse, cet accroissement d'action disparaît, pour revenir quand on reprend de nouveau l'expérience.

Parmi les circonstances qui influent le plus sur la durée du temps

pour arriver à une action chimique constante, il faut placer la masse des gaz et l'intensité de la lumière active. La présence d'un excès de chlore ou d'hydrogène ou d'un gaz étranger retarde la combinaison de chlore et d'hydrogène produite par la lumière. Ainsi, il suffit de la présence de quelques millièmes en volume de gaz oxygène, hydrogène ou chlore, pour produire un effet marqué ; le gaz oxygène donne lieu à un retard encore bien plus grand, mais le gaz acide chlorhydrique n'exerce qu'une influence à peine appréciable.

Pour expliquer cet effet, MM. Bunsen et Roscoe ont donné le nom d'induction chimique à la tendance que deux corps possèdent à s'unir, c'est-à-dire à l'effort que font les molécules pour se combiner, et ils ont admis que cette tendance est contrebalancée par la résistance que les corps opposent à cette union. Si l'équilibre est établi, il peut ne pas y avoir combinaison ; mais la résistance peut être diminuée et par conséquent la tendance augmentée, soit par l'influence de la lumière, soit par d'autres causes, et dans le premier cas l'effet est dû à ce que les auteurs nomment l'induction photo-chimique. Si l'on suppose qu'un corps étranger vienne à se mélanger avec les corps qui manifestent ces effets, la tendance à la combinaison doit être plus ou moins diminuée.

Mais ces idées théoriques ne sauraient être admises sans de nombreuses preuves à l'appui : si l'on examine les effets produits avec d'autres matières impressionnables, on en trouve qui manifestent des actions analogues, d'autres qui ne les produisent pas. Ainsi l'iodure d'argent ou les sels d'argent avec excès de d'azotate, comme on l'a vu page 63, quand ils sont soumis à l'action de la lumière, indiquent deux genres d'action : 1° impressionnés par les rayons les plus réfrangibles, ils donnent des effets qui sont toujours les mêmes, et qui ne dépendent que de l'intensité des rayons actifs ; les effets de coloration et les phénomènes électriques qu'ils présentent le démontrent ; 2° soumis à l'action des rayons les moins réfrangibles, ils ne sont pas impressionnés s'ils n'ont été soumis préalablement à l'action de la lumière, et alors ils sont d'autant plus modifiés que l'impression préalable par les autres rayons a été plus forte. Ainsi, dans ce dernier cas les parties impressionnées du corps jouent par rapport à celles qui ne l'ont pas été le rôle du platine, de l'or en éponge par rapport à un mélange d'hydrogène et d'oxygène, et la lumière vient produire sur le sel d'argent un effet analogue à celui auquel la chaleur donne naissance

dans le cas des corps placés en présence du platine; les diverses parties du rayonnement lumineux agissent donc différemment. Si l'on examine d'autres corps, comme le sous-chlorure d'argent violet, dont on peut suivre l'altération à l'aide des courants électriques, on trouve que dans les mêmes conditions d'intensité lumineuse l'effet chimique est le même, ce qui montre que l'action n'augmente pas d'intensité à mesure que la lumière agit plus longtemps, à moins que ce phénomène ne soit produit dans un temps infiniment court, auquel cas on rentre dans la loi commune, c'est-à-dire que l'on aurait à considérer le temps qui sépare l'instant où la lumière agit, du moment où la décomposition se produit.

Il n'est pas impossible que le mélange des deux gaz chlore et hydrogène exige qu'une certaine somme de forces vives lui soit communiquée avant que la combinaison ne s'opère dans des conditions régulières; mais il faudrait s'assurer si les rayons différemment réfrangibles qui la produisent agissent tous avec la même intensité comparative, et si dans les circonstances particulières de la combinaison des deux gaz on ne trouve pas la cause de l'effet curieux qui vient d'être signalé.

Une des méthodes les plus sûres et les plus faciles à employer pour la comparaison d'effets chimiques par la lumière est celle qui consiste à se servir de l'actinomètre électro-chimique, sur les lames d'argent duquel on a formé de l'iodure ou du sous-chlorure d'argent. On représente de nouveau cet appareil fig. 51, dont il a été question antérieurement. On a vu dans le chapitre précédent, page 146, que l'on pouvait se servir de cet instrument pour reconnaître l'instant où les rayons avaient même intensité, et dès lors en faisant, varier avec une ouverture à bords mobiles, la quantité de rayons parallèles qui tombent sur une lentille, laquelle

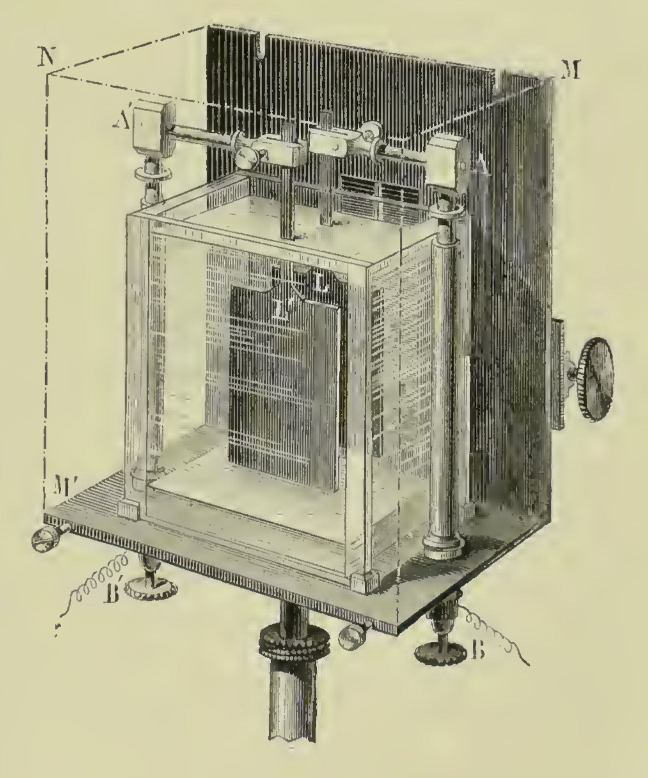


Fig. 51.

réfracte ces rayons et les fait converger sur une même étendue de surface impressionnable, on peut apprécier l'intensité relative des rayons actifs. Comme cet appareil a déjà été décrit, je ne mentionne ici que l'emploi que l'on peut en faire en suivant la marche qui vient d'être indiquée.

Il faut rappeler de nouveau ici que les mesures comparatives prises par une des méthodes qui viennent d'être indiquées peuvent ne pas être les mêmes que celles données par les autres procédés, car chaque substance est impressionnable entre des limites différentes de refrangibilité, et les observations dans chaque cas ne se rapportent qu'aux rayons qui impressionnent la matière à l'aide de laquelle ces observations sont faites.

§ 2. *Effets des différentes sources lumineuses. Soleil, lumière diffuse, lampe à gaz oxygène et hydrogène, flamme du magnésium en combustion.*

Les méthodes dont il vient d'être question ont servi à comparer les intensités chimiques de différentes sources lumineuses avec celle des rayons solaires. On a indiqué dans le chapitre II, page 82, comment MM. Bunsen et Roscoe avaient déterminé les rapports des intensités des différents rayons du spectre pour produire la combinaison du chlore et de l'hydrogène en employant la méthode qui vient d'être décrite, et l'on a vu que l'on observait deux maxima d'action, dont le plus fort était situé entre G et H, et le plus faible était placé au delà de H. Mais en déterminant l'intensité de l'action chimique relative des différents rayons pour les diverses heures du jour, ils ont trouvé que l'absorption, qui pour chacun d'eux augmente avec l'épaisseur atmosphérique traversée, n'est pas la même pour tous. L'étude complète de cette question nécessiterait des expériences faites aux différentes heures du jour et à diverses époques de l'année.

On a vu, d'un autre côté, dans le chapitre précédent, page 137, que l'actinomètre électro-chimique pouvait servir pour la comparaison des effets des différentes parties du spectre, et quels sont les résultats qui ont été obtenus à l'aide des chlorures et iodures d'argent impressionnés par la lumière solaire ou par celle d'une lampe.

MM. Bunsen et Roscoe, comme il a été dit plus haut, ont évalué en fonctions de l'acide chlorhydrique produit la quantité d'action chimique exercée par la lumière, et ils ont même exprimé cette action en indi-

quant l'épaisseur d'acide chlorhydrique qui se formerait à 0° et $0^{m},76$ de pression, si la lumière considérée avait pénétré dans un milieu indéfini qui serait constitué par le mélange de chlore et d'hydrogène à volumes égaux (1).

Ils ont successivement examiné l'action de la lumière diffuse et de la lumière solaire. Pour la lumière diffuse, ils ont étudié l'influence d'une portion restreinte du ciel prise au zénith, puis plus près de l'horizon, et cela à des distances zénithales différentes du soleil; après avoir formé une table pour toutes ces hauteurs, ils ont évalué l'action de la voûte céleste sur une surface donnée et pendant un temps déterminé, et ils ont pu en déduire l'action chimique de la lumière atmosphérique pour diverses heures du jour et dans un lieu d'une latitude donnée.

Passant ensuite à l'action directe du rayonnement solaire, ils ont fait agir un faisceau de rayons introduit dans une chambre obscure sur le mélange gazeux de chlore et d'hydrogène ; en opérant à des hauteurs du soleil différentes, ils ont évalué l'influence absorbante de l'atmosphère sur les rayons qui avaient ainsi traversé des couches d'air d'épaisseur variable. Ils ont donc suivi une méthode analogue à celle dont M. Pouillet avait fait usage pour étudier l'action calorifique solaire, et ont pu en déduire la quantité d'action chimique qui serait exercée par le soleil à la limite de notre atmosphère sur le mélange de chlore et d'hydrogène.

Le calcul, appliqué à leurs observations, a montré que si les rayons solaires ne subissaient aucune absorption atmosphérique en tombant verticalement sur la terre dans une atmosphère indéfinie de chlore et d'hydrogène, ils provoqueraient pendant chaque minute la formation d'une couche d'acide chlorhydrique d'une épaisseur d'environ 35 mètres. Après avoir traversé l'atmosphère, ces rayons n'auraient plus qu'une force représentée par 14 mètres et demi, c'est-à-dire qu'ils auraient perdu environ les $\frac{2}{3}$ de leur intensité primitive.

Les recherches sur le rayonnement solaire ont montré, comme on l'a vu dans le livre Ier, page 43, de ce volume, que dans les mêmes conditions l'action calorifique est au plus diminuée de $\frac{1}{3}$ de sa valeur. Ainsi, les rayons les plus réfrangibles de la lumière qui produisent la combinaison du chlore et de l'hydrogène sont absorbés en plus grande pro-

(1) *Ann. de Poggend.*, t. 108 (1859). — *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 7, p. 71.

portion par l'atmosphère que les rayons les moins réfrangibles. On ne peut représenter par une loi simple les effets produits, car cette absorption se fait sentir inégalement sur les divers rayons, comme on en a la preuve dans la production des raies ou bandes si nombreuses de la partie violette et ultra-violette du spectre.

D'après les nombres précédents, on voit que l'action chimique qui serait développée pourrait être représentée, en équivalent, par une quantité de chaleur très-considérable ; mais cela n'indiquerait rien quant à la puissance dynamique des rayons, car dans cette réaction le faisceau lumineux peut ne servir que de cause déterminante de la combinaison, et celle-ci pourrait s'opérer sans l'intervention immédiate de la lumière. Dès lors les nombres de calories que l'on déduirait de ce calcul ne seraient pas en rapport avec l'énergie seule des rayons solaires.

MM. Bunsen et Roscoe ont étudié, à l'aide du mélange de chlore et d'hydrogène, l'action de la lumière diffuse atmosphérique comme ils l'avaient fait pour la lumière directe. Ils ont reconnu que suivant les hauteurs du soleil l'action provenant de toute la lumière diffuse peut être égale et même supérieure à celui des rayons solaires directs ; ils ont même été conduits à cette conséquence, vérifiée par expérience, que pour les latitudes basses il y a toujours deux instants pendant la journée, l'un avant, l'autre après midi, où les deux actions sont égales. A l'époque où ils ont opéré à Heidelberg, le 21 février 1859, le calcul a donné $9^h 7'$ le matin et $2^h 53'$ après midi, et l'expérience leur a indiqué, pour le second instant, un intervalle compris entre $3^h 1'$ et $3^h 16'$.

Voici, d'après leur détermination, les intensités totales solaires et atmosphériques dans un certain nombre de localités variant de latitude depuis 15° du pôle (île Melville) jusqu'à 30° de l'équateur (le Caire), évaluées en épaisseur d'acide chlorhydrique formé, si les rayons pénétraient dans une atmosphère indéfinie de chlore et d'hydrogène. Les résultats suivants expriment l'action pendant l'intervalle de temps qui s'écoule entre le lever et le coucher du soleil, le jour de l'équinoxe :

	Latitude.	Épaisseur d'acide chlorhydrique.
Ile Melville	74°47′	1306
Reykjawik	64° 8′	2321
Saint-Pétersbourg	59°56′	2806
Heidelberg	49°26′	4136
Naples	40°51′	5226
Le Caire	30° 2′	6437

Les différences entre les effets qui seraient produits dans ces divers pays sont moins considérables qu'on aurait pu le penser, et la cause en est dans la puissante dissémination lumineuse produite par l'atmosphère; en effet, l'action photo-chimique directe du soleil (action mesurée par la combinaison gazeuse chlore et hydrogène) varie comme 1 : 15 : 30 entre l'île Melville, Heidelberg et le Caire, tandis que l'effet de la diffusion atmosphérique varie seulement comme 9 : 16 : 18.

Les recherches de MM. Roscoe et Baxendell (1) démontrent combien l'absorption des rayons actifs très-réfrangibles augmente rapidement avec l'épaisseur de l'atmosphère; ainsi, lorsque le soleil avait une hauteur moyenne de 25° 16′ sur l'horizon, le rapport des intensités chimiques de la lumière directe et de la lumière diffuse sur un papier sensible préparé avec un sel d'argent étant 0,23, celui des intensités lumineuses était 4, c'est-à-dire que l'action de l'atmosphère était 17 fois plus grande sur les rayons impressionnant chimiquement les composés d'argent que sur les rayons agissant sur la rétine. Lorsque cette hauteur du soleil sur l'horizon n'a plus été que moitié, 12° environ, le rapport moyen des intensités chimiques de la lumière directe et de la lumière diffuse n'a plu été que de 0,053 et celui des intensités des rayons lumineux que de 1,4, c'est-à-dire alors que l'action de l'atmosphère s'est trouvée 26 fois plus grande sur les rayons actifs sur le papier impressionnable que sur les rayons lumineux. A des hauteurs moindres, l'action chimique directe du soleil devint inappréciable, tandis que l'intensité des rayons visibles était encore assez grande; les rayons les plus réfrangibles manquaient donc, ce qui est indiqué par la couleur rouge du disque solaire près de l'horizon.

M. Roscoe (2) a appliqué à la détermination de l'intensité chimique des différentes parties du soleil la méthode décrite plus haut, et relative à l'emploi du mélange de chlore et d'hydrogène; il a observé que le centre du disque solaire exerce une action chimique plus intense que les bords. On serait donc conduit à une conséquence analogue à celle que le père Secchi avait déduite de ses observations, et d'après lesquelles le rayonnement calorifique du centre du disque solaire serait plus intense que celui des bords.

MM. Bunsen et Roscoe ont comparé l'action exercée par le soleil sur

(1) Procès-verbaux de la Société royale de Londres, fév. 1866. *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 27, p. 260.

(2) *Annales de Poggend.*, t. 120, p. 131.

le mélange de chlore et d'hydrogène avec celle d'une source lumineuse terrestre, et ils ont employé la lumière provenant de la combustion d'un fil de magnésium. En se basant sur les lois connues relativement à l'influence de l'éloignement plus ou moins grand d'une source lumineuse eu égard à sa surface, ils ont trouvé que la surface d'une masse de magnésium en combustion dans l'air, vue sous une grandeur apparente égale à celle sous laquelle nous voyons le soleil, produit la même action chimique sur le mélange gazeux que lorsque cet astre se trouve à 9° 53′ au-dessus de l'horizon ; c'est-à-dire que si un disque de magnésium en combustion de 1 mètre de diamètre était placé à 107 mètres, il produirait la même action sur le mélange de chlore et d'hydrogène que le soleil à cette hauteur de 9° 53′.

Quant au rapport des effets optiques de ces deux sources de lumière, il est tel que si le soleil est à 67° 22′ de distance zénithale, il a une intensité lumineuse 525 fois plus forte que celle du fil de magnésium de $0^{mm},97$ de rayon qui brûle dans l'air, tandis que le rapport des intensités chimiques sur le mélange de chlore et d'hydrogène est seulement 37. On voit que la combustion du magnésium donne une source lumineuse contenant en abondance des rayons très-réfrangibles.

MM. Fizeau et Foucault (1) ont comparé les intensités lumineuses de la lumière solaire vers midi, par un ciel pur, avec celle de l'arc voltaïque formé au moyen de couples à acide azotique de petites dimensions et d'un nombre variable de 46 à 80, ainsi qu'avec celle de la flamme d'un chalumeau à gaz oxygène et hydrogène portant à l'incandescence un fragment de chaux ; puis ils ont examiné simultanément l'action chimique produite sur des plaques daguerriennes, en cherchant le temps correspondant à l'image naissante sur une plaque placée au foyer de la lentille d'une chambre photographique donnant l'image de la source. Pour obtenir ce temps, ils ont déplacé la chambre noire afin d'avoir sur la même plaque une série d'images dans des temps plus ou moins longs.

Avec la lumière de la chaux incandescente et celle de l'arc voltaïque obtenue au moyen de 46 couples, les rapports des intensités lumineuses et chimiques ont été sensiblement les mêmes ; ce rapport a été de 1 : 34,3. Ainsi, l'arc voltaïque formé avec les 46 couples a exercé une action chimique 34 fois plus forte, en même temps que le photomètre

(1) *Ann. de chimie et de physique,* 3e série, t. 11, p. 370, 1844.

a donné les mêmes indications comparatives. L'irradiation par incandescence de la chaux et du charbon n'a donc pas présenté une beaucoup plus grande proportion de rayons très-réfrangibles.

La lumière solaire directe ayant été comparée à l'arc voltaïque, ils ont trouvé le rapport de 1,000 à 238 ou 240, c'est-à-dire que le soleil a produit sur les plaques daguerriennes une action chimique 4 fois plus énergique que la lumière de la pile composée de 46 petits éléments. Avec 46 grands éléments, le nombre a été porté à 385 et le rapport des intensités d'action chimique s'est élevé à 1,000 : 235, c'est-à-dire que le soleil n'a plus été que deux fois et demie plus fort; des couples voltaïques plus grands encore eussent peut-être donné un arc dont l'action se serait rapprochée encore davantage de celle de la lumière solaire. On voit, d'après cela, qu'avec ces deux sources les intensités des actions chimiques et lumineuses ne sont pas proportionnelles, et que le soleil contient des éléments très-réfrangibles en plus grand nombre que l'arc voltaïque formé entre des électrodes en charbon.

En employant d'autres sources lumineuses et en examinant les effets produits sur diverses substances impressionnables, on pourrait trouver des nombres bien différents, car, ainsi qu'on l'a déjà dit au commencement de ce chapitre, page 147, les substances impressionnables sont affectées par des rayons de réfrangibilité différente, et telles substances seraient proportionnellement plus influencées par la lumière de la chaux incandescente, à égalité d'intensité lumineuse, tandis que d'autres le sont plus vivement par la lumière du magnésium en ignition. Mais comme dans beaucoup de cas, et surtout pour les sels d'argent sensibles, cette dernière source est fort active, on peut l'utiliser, dans certaines circonstances, pour les besoins de la photographie.

§ 3. *Extinction des rayons actifs.*

Lorsque la lumière agit sur les corps, par ce fait même il y a diminution dans l'intensité des rayons réfléchis et transmis, et cette diminution est d'autant plus grande que la quantité d'action chimique a été plus considérable; si même toute la lumière avait été employée à produire l'action chimique, elle serait absorbée en totalité.

Pour démontrer cette proposition, on doit se servir de la réaction chimique produite sur le même composé impressionnable que celui

que l'on vient de faire traverser par le faisceau lumineux, sans quoi en faisant usage d'une autre substance sensible, on pourrait trouver que des rayons inactifs sur la première agiraient sur la seconde. En préparant, par exemple, une dissolution de peroxalate de fer, qui est jaune foncée, et en la plaçant dans un écran à faces parallèles de façon à ce qu'elle soit traversée par un faisceau de rayons solaires, ces rayons, après leur sortie du liquide, ne donnent plus lieu à la décomposition d'une dissolution semblable.

Le mélange de chlore et d'hydrogène conduit à la même conclusion : MM. Bunsen et Roscoe ont cherché quelle pouvait être l'action absorbante du gaz hydrogène et du chlore, pris isolément, sur un faisceau de rayons lumineux émanés de la flamme du gaz, en analysant ce faisceau à l'aide de l'appareil ci-dessus mentionné. Celle de l'hydrogène est sensiblement nulle dans les conditions de l'expérience; mais celle du chlore, placé dans un écran à faces parallèles, a pu être déterminée à l'aide de la combinaison des deux gaz hydrogène et chlore. On a alors substitué au chlore le mélange des deux gaz, et l'absorption a été plus grande que celle qui correspondait à la moitié du chlore, c'est-à-dire à la proportion dans laquelle ce gaz entrait dans le mélange.

Dans ces circonstances, comme dans d'autres semblables, les milieux impressionnables sont en général colorés, et cette coloration est d'autant plus grande que les rayons actifs sont moins réfrangibles. Cela résulte de ce que ces rayons étant absorbés, les corps doivent paraître de la couleur des rayons qui ne sont pas sensiblement éteints, c'est-à-dire de la couleur complémentaire de celle de la partie du spectre qui impressionne ces corps. Il se produit donc le même effet que celui qui a été signalé relativement aux couleurs végétales impressionnables dans le chapitre II, page 100, et d'après lequel, dans la plupart des cas, les parties les plus actives de l'image prismatique ont une couleur complémentaire de la couleur propre des substances.

Il résulte de là que les corps blancs, sensibles à la lumière, doivent être en général impressionnés par les rayons les plus réfrangibles ou ultra-violets; tel est le cas du chlorure d'argent précipité et de la résine de gaïac. Parmi les substances sensibles blanches et transparentes, on peut citer la dissolution contenant du bi-chlorure de mercure et de l'acide oxalique, dont on a parlé précédemment, dissolution qui donne lieu, à la lumière, à une précipitation de proto-chlorure de mercure. Si, comme on l'a déjà dit antérieurement, page 151, on place dans un vase

un peu grand une certaine quantité de cette dissolution, et qu'on enferme une petite quantité du même liquide dans un tube fermé que l'on plonge au milieu du premier vase, en exposant le tout aux rayons solaires, alors qu'au bout de peu d'instants on a un précipité abondant dans le liquide du grand vase, celui de l'éprouvette ne donne qu'un dépôt très-faible. Dans ce cas, les rayons actifs ayant exercé leur action sur le liquide extérieur dont l'épaisseur autour du tube était de 5 à 6 centimètres, se sont trouvés éteints en partie.

Quand on examine l'action chimique exercée par la lumière sur un corps impressionnable, après son passage à travers une autre substance sensible, on pourrait, comme on l'a dit plus haut, arriver à une autre conclusion, car les rayons actifs sur les deux corps pourraient ne pas avoir la même réfrangibilité. Ainsi, des rayons jaunes qui auraient traversé le mélange de chlore et d'hydrogène pourraient ne plus agir sur ce mélange, mais exercer une influence sur le sous-chlorure d'argent, qui est impressionnable sous l'action des rayons les moins réfrangibles.

Cependant, si les matières différentes sont impressionnées par les mêmes parties du spectre, on observe des effets analogues à ceux cités plus haut, même quand les substances qui reçoivent l'impression lumineuse sont des substances phosphorescentes, c'est-à-dire lorsque les rayons sont éteints par une autre action moléculaire que par des réactions chimiques. Tel est l'effet que j'ai observé, comme je l'ai déjà rapporté dans le 1er volume page 400, en recevant dans une chambre obscure, disposée pour les images photographiques et au foyer de l'objectif, l'image d'un spectre solaire projetée sur différents corps impressionnables. Si ces images photographiques sont reçues au moyen de l'objectif de la chambre noire sur des plaques daguerriennes, on reconnaît que lorsque le spectre solaire frappe une surface enduite d'une matière phosphorescente très-impressionnable, la portion du spectre où la phosphorescence a lieu ne donne par diffusion, sur l'épreuve photographique, qu'une impression plus faible que la même surface qui n'est pas recouverte de matière phosphorescente, preuve d'une diminution dans la quantité de rayons diffusés et par conséquent de l'extinction d'une partie de la lumière incidente.

Je rappellerai comme autre exemple d'un phénomène semblable, et ainsi que cela a été dit antérieurement, page 106, que la dissolution de bisulfate de quinine arrête tous les rayons situés au delà des raies H de

l'extrême violet, et que sous un tel écran la coloration de la résine de gaïac, comme les autres réactions chimiques qui ont lieu habituellement dans cette partie du spectre, ne se produisent plus. Cet effet provient de l'action de phosphorescence auquel donne lieu la dissolution, et qui fait que tous les rayons actifs d'une réfrangibilité plus grande que H sont éteints.

LIVRE III.

PHOTOGRAPHIE.

CHAPITRE PREMIER.

Daguerréotype.

§ 1. *Découvertes de Nicéphore Niepce et de Daguerre. Méthodes d'opération.*

A la fin du siècle dernier, comme on l'a vu dans les chapitres précédents, on connaissait quelques-uns des effets chimiques que la lumière peut produire, et entre autres la coloration que prennent plusieurs composés d'argent; aussi ne doit-on pas s'étonner que des physiciens et des artistes aient songé à en faire usage pour tracer, par l'action de la lumière, les dessins qu'ils voulaient représenter. Alors Charles se servait dans ses cours d'un papier enduit probablement d'un sel d'argent pour engendrer des silhouettes à l'aide de l'action lumineuse, et Wedgewood, en 1802 (1), se proposait de copier des peintures de vitraux d'église, ou des gravures, à l'aide d'enduits d'azotate ou de chlorure d'argent sur du papier ou de la peau ; quant aux images de la chambre noire, c'est-à-dire aux images vues dans cet appareil que Jean-Baptiste Porta avait découvert il y a trois siècles (2), Wedgewood les trouvait trop faibles

(1) *Journal de l'Institution royale de la Grande-Bretagne,* juin 1802.

(2) *Magiæ naturalis libri quatuor, sive de miraculis rerum naturalium,* par Jean-Baptiste Porta. La première édition en 4 livres a été publiée à Naples, en 1558; dans le chapitre 2, à la page 135, se trouve la description des effets de la chambre noire, qui était alors formée au moyen d'une ouverture faite à un volet, et en introduisant la lumière dans la chambre à l'aide d'un miroir concave.

Une autre édition publiée à Naples trente ans après (1588) est en 20 livres; la description de la chambre noire se trouve au chap. 17, p. 266, et Porta indique comment, en plaçant une lentille devant l'ouverture de cette chambre, les objets sont vus avec plus de netteté. « ....Si chrystallinam lentem foramini appones, jamjam clariora cernes... »

*

pour produire de l'effet sur l'azotate d'argent dans un temps qui ne fût pas trop prolongé. A peu près à la même époque, H. Davy parvenait à copier, sur des surfaces enduites de sels d'argent, de petits objets vus au microscope solaire; mais aucun expérimentateur n'avait rendu la surface inactive après l'influence lumineuse, de façon à conserver les empreintes formées.

Vers 1814, Nicéphore Niepce (1) était retiré aux environs de Châlons-sur-Saône, et cherchait à fixer les images de la chambre noire; mais la substance impressionnable qu'il employait, le bitume de Judée, étant très-peu impressionnable, il porta particulièrement son attention sur l'application que l'on pouvait en faire à la reproduction photographique des gravures; il découvrit que le bitume de Judée exposé à la lumière devient presque insoluble dans l'huile de naphte, alors que celui qui n'est pas impressionné est soluble, de sorte que la surface d'une plaque métallique peut recevoir un dessin formé de parties résineuses et être partiellement attaquée par des acides; ainsi il pouvait produire un dessin à la surface d'une plaque, lequel était ensuite inaltérable à la lumière. En 1827 il présenta un mémoire sur ses travaux photographiques à la Société royale de Londres. Ayant appris que Daguerre s'occupait du même sujet que celui qu'il traitait, il forma avec lui, en 1829, un acte d'association pour l'exploitation en commun de leurs méthodes photographiques.

Daguerre perfectionna d'abord les méthodes découvertes par Nicéphore Niepce, mais bientôt il leur en substitua d'autres, qui lui étaient entièrement propres; en effet, en 1831 (2), en voulant noircir les fonds des lames de plaqué d'argent sur lesquelles étaient obtenus les dessins au bitume de Judée, il exposa les parties découvertes de ces lames à l'action de la vapeur d'iode, et reconnut l'extrême sensibilité à l'influence de la lumière de l'iodure d'argent formé à la surface de l'argent métallique. En 1835, après bien des essais, il découvrit la propriété remarquable que possèdent les parties impressionnées de la couche d'iodure d'argent de fixer les vapeurs et en particulier la vapeur de mercure; il venait d'atteindre

(1) J'ai suivi ici l'*Exposition de la méthode de Daguerre,* par Arago, qui se trouve dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut de France*, t. 9, p. 250, 19 août 1839. Depuis, on a publié bien des documents sur la découverte de la photographie; on peut consulter notamment un ouvrage que vient de faire paraître M. V. Fouque, et qui a pour titre « la *Vérité* sur l'invention de la photographie; histoire de Nicéphore Niepce. »

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* t. 9, p. 424.

le but si longtemps désiré, la fixation des images de la chambre noire. Daguerre perfectionna d'abord sa découverte, qui ne fut publiée que quatre ans après, en 1839, et qui fut l'objet d'une récompense nationale.

Depuis cette époque on sait combien de recherches cette découverte a fait naître et quels sont les nombreux changements qu'ont subis les procédés à l'aide desquels on obtient les images de la chambre noire, à tel point que dans les méthodes photographiques actuelles on ne retrouve presque rien du procédé primitif de Daguerre. Des recherches dans le but de fixer les images de la chambre noire ont peut-être été faites en même temps que celles de Daguerre; mais c'est lui qui fit connaître la réaction si curieuse au moyen de laquelle une action chimique commencée par la lumière sur l'iodure d'argent et non encore apparente, peut être rendue appréciable par une action ultérieure, par l'action de la vapeur de mercure (voir page 75), et la découverte de cette réaction a précédé l'observation des effets de continuation de réduction des sels d'argent au moyen de certains réactifs, c'est-à-dire a conduit aux méthodes photographiques actuellement usitées.

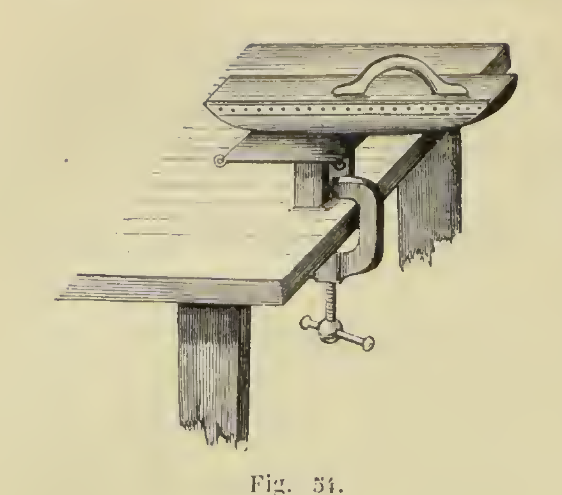
Bien que l'on n'emploie aujourd'hui le procédé de Daguerre que dans des circonstances spéciales ou pour des recherches scientifiques, comme on l'a vu précédemment, cependant ce procédé, avec les additions qu'il a reçues, pouvant être considéré comme une méthode photographique complète, il est intéressant d'en exposer succinctement les principes.

On peut diviser l'opération en six manipulations distinctes, qui sont :

1° Le décapage et le polissage de la lame de plaqué d'argent,
2° La formation de la couche sensible,
3° L'exposition à la chambre noire,
4° L'exposition de la lame à la vapeur mercurielle,
5° Le lavage de la lame à l'hyposulfite de soude,
6° La fixation et le virage du dessin au moyen d'un sel d'or.

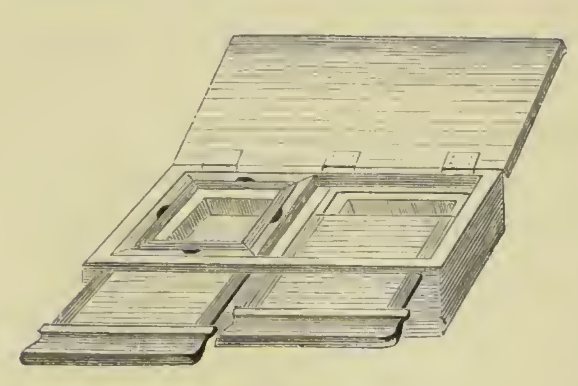
Les cinq premières manipulations étaient connues de Daguerre; la sixième a été ajoutée depuis.

Décapage et polissage. — La surface de la lame de plaqué doit être parfaitement décapée et bien polie, sans quoi des taches ou des raies pourraient se trouver dans le dessin. On place la lame de plaqué dont l'épaisseur d'argent est $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{20}$ ou $\frac{1}{30}$ de mill. peu importe, après en avoir abattu les bords, sur un support fixé à une table comme le représente


Fig. 54.

la figure 54, et on la décape avec du tripoli humecté d'essence de lavande au moyen d'un tampon de coton. Après avoir nettoyé ainsi cette lame, on passe encore sur sa surface un tampon de coton humecté d'alcool, et quand elle est sèche, à l'aide d'un polissoir en peau et du rouge d'Angleterre, on lui donne le poli nécessaire pour la netteté de la formation de l'image.

Formation de la couche sensible. — L'iodure d'argent impressionnable s'obtient simplement en exposant la lame de plaqué à l'influence de la vapeur d'iode. Pour régulariser l'action, on répand l'iode au fond d'une cuvette en porcelaine placée d'un côté d'une boîte divisée en deux compartiments et représentée ci-contre, figure 55 ; l'autre côté contient une seconde cuvette, dont l'usage va être indiqué plus loin. A la surface de chaque cuvette glisse un verre dépoli faisant tiroir. La partie supérieure de la boîte est munie d'une rainure dans laquelle glisse un cadre qui reçoit la plaque d'argent, et que l'on peut amener successivement au-dessus de chaque cuvette de façon à la soumettre à l'influence des vapeurs qui en émanent. Si l'une des cuvettes contient de l'iode sur toute sa partie inférieure, la vaporisation de l'iode ayant lieu à la température ambiante, il se forme de l'iodure d'argent à la surface de la lame. Quelquefois, au lieu d'iode, on place un mélange d'iode et de magnésie dans la cuvette afin de disséminer davantage cette substance volatile.


Fig. 55.

La durée de l'exposition de la lame d'argent à la vapeur d'iode dépend de la température extérieure, et peut varier de 2 à 3 minutes ; il faut s'arrêter quand la couche devient jaune d'or. Lorsqu'on ne connaît pas exactement le temps d'exposition pour atteindre cette épaisseur, bien que l'opération doive se faire à l'abri de la lumière et qu'il ne faille pas exposer la lame à l'influence de la lumière diffuse, on soulève un peu la lame et on la regarde pendant un temps très-court à l'aide

d'une faible lumière, en examinant, par réflexion sur sa surface, l'image d'un papier blanc ; la teinte jaune d'or est alors facile à apprécier.

Telle était la préparation de la lame sensible par Daguerre; quand il exposait cette lame à la chambre noire, il fallait, même au soleil, 10 à 15 minutes d'exposition pour obtenir une épreuve. M. Claudet (1) remarqua qu'en exposant la lame ainsi iodurée au chlore ou à la vapeur de chlorure d'iode, on la rendait beaucoup plus impressionnable, et M. Fizeau (2) indiqua le brome comme donnant une sensibilité encore plus grande. Actuellement on opère comme il suit :

On place dans la seconde cuvette de la boîte à compartiment de l'eau bromée, ou mieux de la chaux éteinte qui a absorbé du brome, et qui émet lentement cette substance. Quand la plaque est iodée, on fait glisser le cadre sur le rebord de la boîte ; on l'amène au-dessus de la cuvette à brome, et on tire le verre dépoli qui s'opposait à l'action de la vapeur. Le temps de l'exposition doit être de 15 à 20 secondes ou même 30 secondes suivant la température extérieure. On ramène alors la plaque au-dessus de l'iode, et l'on fait un second iodage pendant un temps assez court, qui doit être du tiers au quart du temps pendant lequel la vapeur de brome a agi; par conséquent, cette durée doit être de 8 à 10 secondes.

Ce second iodage est nécessaire pour éviter que les images à la chambre noire ne soient voilées, ce qui arrive souvent sans cette préparation. Dans cet état, la plaque est environ 60 fois plus sensible qu'avant l'action du brome, et dans les conditions où la surface simplement iodée aurait nécessité une action pendant 15 minutes pour donner une image, la lame iodée et bromée peut la donner en 15 secondes.

On a déjà parlé antérieurement, page 90, de l'augmentation de sensibilité que présente l'iodure d'argent dans cette circonstance; mais on n'en connaît pas la cause, et l'on ne sait pour quel motif un mélange d'iodure et de chlorure d'argent, ou d'iodure et de bromure, est plus impressionnable que chacune des deux substances prises isolément.

Cette préparation doit être faite à l'obscurité ; quand la plaque a été exposée à l'influence du brome, il est nécessaire que la moindre trace de lumière diffuse ne vienne pas l'impressionner. Comme on a vu dans le livre II, page 90 et suivantes, que les rayons les moins réfran-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 12, p. 1059.
(2) Id., t. 23, p. 89.

gibles n'agissent pas pour commencer une action sur l'iodure d'argent, et influencent peu l'iodure mélangé de bromure, souvent on est dans l'habitude de mettre des verres jaunes ou rouges aux cabinets dans lesquels on fait ces préparations, ou de les éclairer à l'intérieur à l'aide de lampes entourées de verre de cette couleur. Quand il s'agit de plaques bromurées, les rayons jaunes pourraient encore agir, quoique faiblement, et il est préférable de n'avoir qu'une lumière de faible intensité, ou mieux une lumière orangée ou rouge.

Exposition à la chambre noire. — La plaque une fois préparée est transportée dans la chambre noire où elle doit recevoir l'impression des rayons qui viennent former l'image que l'on veut reproduire photographiquement. A cet effet, la plaque est placée dans un châssis en bois représenté fig. 56, lequel est fermé par une planchette s'appliquant sur le verso et appuyant cette plaque contre des traverses fixes; elle peut donc être substituée, à un moment donné, à la glace dépolie de la chambre noire. Une seconde planchette ferme le châssis à la partie antérieure, et peut être tirée à volonté, de sorte que la plaque peut être exposée ou soustraite à l'influence de la lumière.

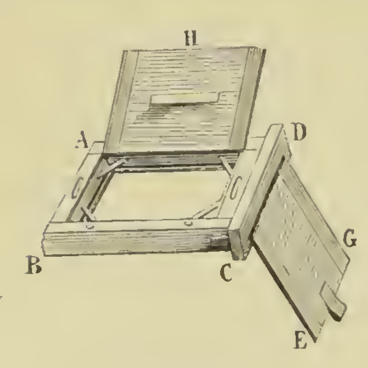


Fig. 56.

La chambre noire avait déjà été perfectionnée par Daguerre ; mais, depuis, la construction des objectifs a été le sujet de recherches importantes, et notamment la disposition des objectifs doubles destinés à la reproduction des portraits et de la nature vivante. Je n'ai pas l'intention de décrire ici les appareils en usage, et je renverrai pour cela aux divers traités de photographie publiés dans ces dernières années, mon but étant de parler seulement de l'action de la lumière et des diverses réactions chimiques que cet agent peut produire et qui ont pu être utilisées.

La durée de l'exposition de la plaque à la chambre noire est très-variable, et dépend de l'ouverture de l'écran placé en avant du diaphragme, de la distance focale de l'objectif et de l'intensité lumineuse de l'objet à reproduire ; on peut avoir une impression suffisante en une seconde ou bien quelquefois il faut deux ou trois minutes.

Exposition de la plaque à la vapeur mercurielle. — Si l'on voulait attendre que la couche impressionnable placée au foyer de la chambre noire donnât immédiatement, par un changement de coloration, l'indication d'un changement chimique dû à l'action de la lumière, et qu'il y

eût par conséquent une image sur la surface, il faudrait peut-être plusieurs heures ; dans ces conditions, l'image serait négative, c'est-à-dire que les parties éclairées de chaque objet seraient représentées par des ombres sur la couche sensible, et vice versa. Mais si avant que cette image apparaisse, et alors que l'impression à la lumière n'a été que de faible durée, on vient à exposer la plaque sensible à la vapeur de mercure, comme on l'a déjà dit, page 75, la vapeur de mercure ne se fixe que sur les points qui ont été frappés par la lumière, et donne une image positive des objets dont les dessins se peignaient sur la glace de la chambre noire. Telle est réaction curieuse qui est la partie essentielle de la découverte de Daguerre ; nous examinerons plus loin quel est l'effet qui peut être produit dans cette circonstance.

Pour exposer la lame à l'influence de la vapeur de mercure, on se sert d'une boîte en bois de forme parallélipipède représentée fig. 57, dont le fond est en fer. Une lampe à alcool est destinée à chauffer ce fond métallique, qui est légèrement concave, et qui peut contenir quelques grammes de mercure. Un thermomètre a son réservoir plongeant dans le mercure à l'intérieur de la boîte, et sa tige ressort à l'extérieur de façon à indiquer à l'opérateur la température du bain mercuriel. La plaque impressionnée qui vient d'être retirée de la chambre obscure est placée, dans l'intérieur de la boîte, sur des coulisses inclinées à 45° d'arrière en avant, de sorte que si à l'aide d'un volet fixé à la partie antérieure de la boîte à mercure, l'opérateur veut regarder la plaque, il la voit pendant qu'elle reçoit l'action de la vapeur de mercure.

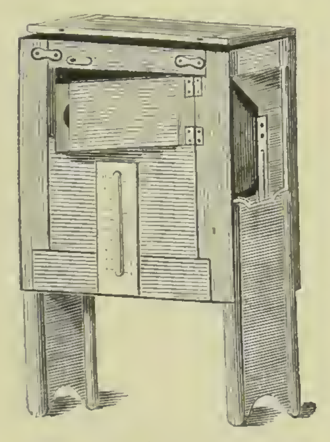


Fig. 57.

On chauffe le mercure jusqu'à 40 ou 50°; en tout cas il ne faut pas dépasser 60°; l'opération doit être conduite avec lenteur, et doit durer quelques minutes. Comme la lumière diffuse active ne doit pas agir sur la lame, on fixe d'un côté de la boîte une petite lame de verre jaune, et l'opérateur, en éclairant la plaque sensible de côté avec une bougie, ne fait tomber que de la lumière jaune inactive sur la plaque et peut suivre l'apparition de l'image. La boîte à mercure doit être placée dans une chambre ou dans un cabinet obscur, lequel ne serait éclairé qu'au moyen de verres rouges ou orangés, comme on l'a dit plus haut.

Lavage à l'hyposulfite de soude. — L'image une fois formée sur la surface sensible n'est pas inaltérable à la lumière : exposée à l'influence de la lumière diffuse ou solaire, elle disparaîtrait, par suite de la coloration de l'iodure d'argent qui recouvre toute la surface. On enlève aisément cette dernière substance en plongeant la lame dans un des dissolvants de l'iodure ; celui qui a été indiqué par Daguerre, et qui réussit le mieux, est une dissolution aqueuse d'hyposulfite de soude. On la forme en dissolvant de 10 à 20 grammes d'hyposulfite dans 100 gr. d'eau ; en plongeant dans ce liquide la lame de plaqué après sa sortie de la chambre noire, elle perd, par dissolution, les sels d'argent non impressionnés, et il reste à sa surface le dessin formé par un amalgame de mercure et d'argent représentant les parties claires de l'image par rapport au fond bruni de la plaque, qui donne les ombres. On lave alors la plaque à l'eau distillée ; on la sèche à l'aide d'une lampe à alcool, et cette manipulation se trouve terminée.

Fixation et virage du dessin. — Tel était, sauf l'addition des substances accélératrices, le procédé indiqué par Daguerre ; l'épreuve est alors rendue inaltérable par la lumière ; mais la moindre action mécanique peut l'endommager ; il suffit en effet de passer la main ou un tampon de coton sur sa surface pour enlever les parties claires et détruire l'effet dû à l'action de la vapeur mercurielle. M. Fizeau (1) a indiqué une réaction qui possède, en outre de l'avantage de rehausser les tons du dessin, celui de rendre fixe ce dessin sur la surface du plaqué, de sorte qu'un très-léger frottement ne peut l'enlever. Cette réaction consiste dans le dépôt d'une légère couche d'or à la surface de la lame ; pour l'obtenir, il s'était servi d'une dissolution de chlorure d'or dans l'hyposulfite de soude ; mais depuis que MM. Fordos et Gelis (2) ont reconnu que le composé actif formé dans cette circonstance est un double hyposulfite d'or et de sodium, on emploie généralement une dissolution de 1 gr. de ce double hyposulfite cristallisé dans 800 gr. d'eau ou même dans 1,000 gr. d'eau. On place sur un trépied la lame de plaqué qui vient d'être lavée à l'hyposulfite de soude puis à l'eau distillée, et qui est encore humide, et à l'aide de vis calantes on la rend parfaitement horizontale ; on verse sur sa surface une couche de la dissolution précédente, de façon à ce qu'elle ait une épaisseur de 1 millim. environ, et l'action capillaire qui a lieu vers les bords main-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 11, p. 237 et 906.
(2) *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 13, p. 394 (1843).

tient cette dissolution sur la surface de la lame; on chauffe cette lame par dessous à l'aide d'une lampe à alcool et quand les bulles de vapeur commencent à se dégager, on rejette l'excès de dissolution, on lave la lame à l'eau distillée et on la fait sécher. On trouve alors que l'or s'est fixé sur le fond bruni de l'argent, ce qui donne du ton aux noirs de l'image; en même temps, l'amalgame d'or conservant une teinte blanche, les blancs ne sont pas altérés, et de plus un léger frottement ne détruit pas le dessin.

§ 2. *Action de la lumière lors de la formation de l'image daguerrienne. Action des rayons différemment réfrangibles.*

Telle est la méthode suivie actuellement quand on veut reproduire les images de la chambre noire sur une lame de plaqué d'argent. On voit, en résumé, que cette lame recouverte d'iodure d'argent mêlé de chlorure ou de bromure, et qui placée au foyer de la chambre noire aurait demandé un temps très-long pour produire une image, lorsqu'elle est exposée à l'action de la vapeur mercurielle, après une courte impression à la lumière, donne une image qui apparaît immédiatement.

L'hypothèse la plus probable pour expliquer cet effet consiste à supposer que l'iodure d'argent impressionné est changé en sous-iodure (voir page 76), et que ce sous-iodure en présence de la vapeur de mercure donne de l'argent métallique qui s'amalgame avec elle, et de l'iodure qui, restant à la surface de la lame, est ensuite dissous par l'hyposulfite de soude. Il faut remarquer toutefois que dans cette réaction si curieuse de la vapeur de mercure le dépôt de mercure ne paraît pas en rapport avec l'action exercée sur la couche d'iodure d'argent, puisque cette réaction est inappréciable par tout autre réactif, et que la quantité de mercure fixée sur la lame est plus grande que celle du sous-iodure d'argent formé. C'est même le motif qui avait fait attribuer la condensation de la vapeur mercurielle à une modification physique de la couche d'iodure.

M. Carey Lea (1), d'après cette hypothèse, a fait plusieurs expériences curieuses dans le but de montrer qu'une action physique exercée sur l'iodure d'argent pouvait mettre cette substance dans des conditions analogues à celles que lui communique la lumière; ainsi, la pression

(1) *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 12, p. 64, 88, 147 (1866), et t. 13, p. 182, 1867. Ces expériences ont été répétées par M. A. Girard.

de même que le contact d'un objet sur une surface sensible d'iodure d'argent peut permettre de développer une image par les procédés ordinaires, comme on la développe après l'action lumineuse. Dès lors M. Carey Lea pense que la lumière agit en donnant à l'iodure une impression physique qui peut se perdre peu de temps après, de même que l'impression phosphorescente de certains corps. Mais de ce que l'iodure peut être mis dans des conditions analogues par des actions physiques ou chimiques, il ne s'ensuit pas que l'influence de la lumière doive être purement physique; il résulte au contraire des effets dont il a été question dans le I[er] chapitre du livre précédent, ainsi que des phénomènes électro-chimiques produits sous l'influence des rayons lumineux, que l'hypothèse basée sur la décomposition chimique de l'iodure est la plus probable.

L'image que l'on fait apparaître par l'action de la vapeur de mercure peut être obtenue sans l'intervention d'aucune substance et par l'influence seule de la lumière ; dans ce cas, la réduction de l'argent métallique qui suit une action commencée est encore la preuve de l'action chimique exercée sur les lames daguerriennes après une courte exposition à la lumière, bien que cette dernière action ne soit pas immédiatement appréciable. Pour observer cet effet, il faut avoir recours aux phénomènes de continuation que j'ai observés en 1840, et dont on a parlé page 76 : on a vu qu'une plaque daguerrienne simplement iodée exposée pendant un temps très-court à l'influence de la lumière, et même pendant un temps inférieur à celui qui est nécessaire pour qu'elle fixe la vapeur de mercure, continue à être impressionnée dans la partie rouge et jaune du spectre solaire, comme si elle eût été exposée à l'action des rayons primitivement actifs bleus et violets. On peut obtenir de semblables effets avec des écrans de verre jaune et rouge; et même, comme on l'a déjà dit page 77, cette action est telle qu'une image daguerrienne commencée et provenant d'une simple exposition à la chambre noire, image qui est encore latente, exposée sous un verre jaune à l'influence de la lumière solaire, apparaît peu à peu sous l'influence seule des rayons qui ont traversé cet écran coloré, et la réduction de l'argent métallique dans les parties primitivement insolées donne du blanc comme l'aurait fait la vapeur de mercure ; ainsi, par la lumière seule, en choisissant la réfrangibilité des rayons actifs, on obtient des images de la chambre noire sur l'iodure d'argent. Ces images sont ensuite lavées et fixées comme il a été dit plus haut.

Il est évident, d'après cela, que même dès les premiers moments de l'impression lumineuse sur l'iodure d'argent, la décomposition chimique de ce corps est commencée, et que dès lors les réactifs tels que la vapeur mercurielle peuvent continuer cette action, comme le font certains rayons de lumière après un temps suffisant. Nous verrons également, dans le courant de ce livre, que les lames iodurées et impressionnées plongées dans des bains métalliques, et en rapport avec le pôle négatif d'un appareil voltaïque, peuvent donner lieu à une précipitation de métal qui s'opère inégalement suivant l'impression primitive de la surface; dans ce cas, la différence de composition de la substance est mise en évidence autrement que par la vapeur de mercure et par l'action des rayons lumineux les moins réfrangibles.

Les lames de plaqué d'argent simplement iodurées, ou attaquées par l'iode et le chlorure d'iode, offrent bien les effets de continuation sous l'influence de la partie rouge et jaune du spectre; mais si elles ont reçu du brome, comme on l'a vu, page 90, elles ne manifestent plus ce phénomène remarquable. Il faut rémarquer que les verres jaunes sont les écrans les meilleurs pour obtenir les tons blancs lorsqu'on veut se servir de la lumière seule pour reproduire les images de la chambre noire; les verres rouges donnent aussi les effets de continuation, mais quand ils sont trop foncés, ils ne laissent passer que la partie extrême la moins réfrangible du spectre, et alors la réduction métallique se complique des actions inverses dont il a été question page 91.

L'étendue de la partie active du spectre lumineux sur l'iodure d'argent, comme on l'a déjà vu, et comme cela résulte de l'inspection de la figure 46, explique comment les objets colorés viennent inégalement bien

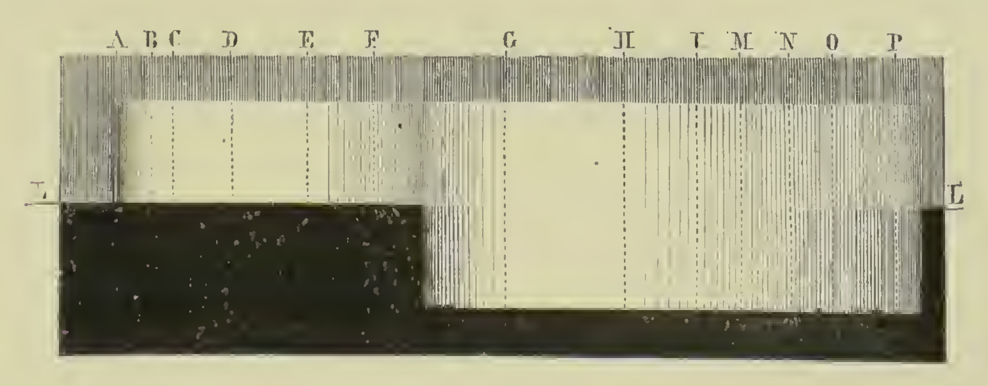


Fig. 46.

dans la reproduction des images par le daguerréotype. Les rayons bleus, violets et ultra-violets, compris depuis G jusqu'en P, étant les seuls qui

commencent et continuent l'action chimique sur l'iodure d'argent, les objets qui par diffusion émettent des rayons de cette réfrangibilité sont les seuls aussi qui donnent des rayons actifs et dont les images puissent apparaître; ceux qui n'envoient dans la chambre noire que des rayons peu réfrangibles jaunes et rouges ne doivent pas mieux venir que des objets noirs, c'est-à-dire qu'ils forment ombres. Mais comme en général les objets donnent par diffusion des lumières composées, il en résulte que même avec des tons rouges ils émettent souvent quelques-uns des rayons très-réfrangibles, et peuvent alors présenter des demi-teintes et des dégradations de tons.

Dans la reproduction des objets colorés et des tableaux, il faut avoir égard à ces divers effets. Si l'on remarque que les rayons verts, jaunes et rouges, quand on se sert d'iodure d'argent simple ou d'iodure mélangé de chlorure, exercent également une action quand la substance a reçu un commencement d'impression, il y aurait avantage à se servir alors de lames que l'on aurait exposées préalablement à la lumière diffuse pendant un temps assez court pour que l'image ne soit pas voilée, mais suffisant pour que les rayons les moins réfrangibles puissent agir. Lorsqu'on emploie des plaques d'argent iodurées puis bromurées, la fig. 45, page 83, indique que l'impression prismatique du côté du vert est plus longue qu'avec l'iodure simple, et que certains tons verts qui ne viendraient pas dans ce dernier cas présentent des demi-teintes après la fixation de l'image ; de là un meilleur résultat, mais il ne faut pas que la lame ait vu le jour avant l'action de la chambre noire.

On peut remarquer encore que les objets bleu clair apparaissent comme des objets blancs, car les uns comme les autres envoient à peu près autant de rayons actifs sur la plaque impressionnable ; les objets verts au contraire, tels que les feuilles dans un paysage, apparaissent presque comme des corps noirs. J'ai pensé alors, comme je l'ai proposé, que si l'on plaçait devant l'objectif d'une chambre noire un écran coloré en vert clair de façon à faire voir tous les objets sous le même ciel, c'est-à-dire à enlever les rayons les plus réfrangibles trop actifs, on augmenterait le temps de la pose à la chambre noire bien entendu, mais on aurait plus de demi-teintes dans les objets qui sont colorées des nuances vertes et jaunes (1).

La reproduction des images de la chambre noire par l'action de la

(1) *Mém. des savants étrangers de l'Acad. des sciences*, t. 8, page 381 (1840).

vapeur de mercure donne lieu à un effet qu'il est important de signaler, car il limite le temps d'exposition de la surface sensible au foyer de la chambre noire, sans quoi l'on est exposé à obtenir des épreuves dans lesquelles les noirs et les blancs n'ont plus les mêmes intensités relatives. On observe que si l'iodure impressionné fixe la vapeur de mercure de façon à donner, par contraste, une teinte blanche par rapport au fond bruni de la plaque, lorsque la durée de l'impression a dépassé une certaine limite, la vapeur de mercure en se fixant sur les parties impressionnées, s'étale pour ainsi dire et donne une surface miroitante qui paraît sombre au lieu de rester blanche; les parties de la surface où l'impression lumineuse a été trop vive sont alors dites solarisées. On ne peut remédier à cet inconvénient que présente le mercure et il faut nécessairement limiter la durée de l'exposition de la surface impressionnable à la chambre noire.

CHAPITRE II.

Photographie. Épreuves sur papier, sur collodion, albumine, gélatine, etc.

§ 1. *Épreuves négatives, ou clichés.*

Épreuves sur papier. — Après que l'on eut perfectionné le procédé de Daguerre pour fixer les images de la chambre noire, on comprit que pour que cette magnifique découverte pût être utilisée dans un grand nombre de circonstances, il fallait obtenir les images, non pas sur une surface miroitante comme une surface métallique, mais sur papier, et même qu'une impression étant obtenue, il était nécessaire que l'on pût en reproduire un grand nombre d'exemplaires.

Si l'on plaçait au foyer d'une chambre noire une feuille de papier, de coton, d'étoffe, enduite d'un sel d'argent, on sait qu'après un temps suffisamment long on obtiendrait une image inverse de celle des objets, c'est-à-dire négative; les parties claires seraient représentées en noir et réciproquement. Si l'on eût eu un moyen d'activer cette réaction, on aurait même résolu avant Daguerre le problème de la fixation

des images de la chambre noire : en effet, après une exposition de courte durée, l'impression est commencée et la continuation de coloration sous l'influence des verres rouges et jaunes (1), montre que sur papier sensible l'image latente peut apparaître dans des conditions analogues à celles dans lesquelles elle se montre sur les plaques d'argent iodurées par l'influence de la vapeur de mercure.

M. Talbot, en 1841 (2), découvrit une réaction chimique qui lui permit d'atteindre ce but : cette réaction consiste essentiellement en ce que si une feuille de papier enduite d'un sel d'argent, par exemple d'iodure avec excès d'azotate, est exposée pendant un temps très-court au foyer de la chambre noire, vue à l'aide d'une bougie à l'abri de la lumière du jour elle ne présente aucune trace de l'image; mais que si on la plonge alors dans une dissolution d'acide gallique (ou, comme le faisait M. Talbot, dans un mélange d'acide gallique et d'azotate d'argent, c'est-à-dire de gallonitrate d'argent), et qu'on élève un peu la température, l'image apparaît aussitôt, les parties de la surface qui ont été frappées par la lumière devenant noires. L'acide gallique agit donc comme réductif, mais ne porte son action que sur les parties frappées par la lumière, et cela suivant l'intensité de l'action lumineuse. On fixe l'image obtenue comme à l'ordinaire, en lavant le papier, d'abord à l'eau, puis avec une dissolution d'hyposulfite de soude ; ensuite, cette image étant négative, on s'en sert comme d'un cliché, on la copie par décalcage autant de fois que l'on veut sur des feuilles de papier impressionnable de chlorure ou de bromure d'argent, et l'on a alors des images positives du paysage ou du dessin que l'on a voulu reproduire.

La partie essentielle de cette méthode est l'action réductrice qu'exerce l'acide gallique sur le sel d'argent impressionné, et qui est analogue à celle que la vapeur de mercure exerce sur l'iodure d'argent formé à la surface d'une plaque d'argent ; on a déjà parlé de ces actions, chapitre Ier, page 77, et l'on a vu que non-seulement la matière organique oxydable continue à réduire l'iodure impressionné, mais encore que si une solution argentifère se trouve mélangée à l'acide gallique, et qu'au lieu d'opérer avec du papier sensible on se serve de collodion, comme on le verra plus loin, de l'argent métallique provenant de la dissolution se fixe sur les parties réduites (3), en sorte que

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 11, page 102, 1840.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 12, p. 1055, 1841.

(3) *Mémoire* de M. Davanne. — *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 3, p. 136

l'image contient plus d'argent qu'il ne s'en serait déposé si la couche impressionnable seule eût été réduite. Il est probable, comme on l'a déjà dit à l'occasion du daguerréotype, page 175, pour rendre compte de l'effet de la vapeur de mercure, que l'acide gallique réduit d'abord l'iodure d'argent qui a commencé à s'impressionner, et que, par action moléculaire, le dépôt d'argent peut continuer à se faire dans les mêmes parties. Ce dépôt doit être d'autant plus énergique que l'action lumineuse primitive a été plus vive, car il est possible, même sur collodion après la fixation de l'épreuve, de renforcer une image trop faible de ton en la plongeant successivement dans un bain d'azotate d'argent et dans un bain d'acide gallique; ce qui montre que l'argent réduit ne se dépose pas uniformément sur la surface, mais en plus ou moins grande proportion suivant l'épaisseur du dépôt primitif.

Tel est en principe la méthode de M. Talbot, qui sert de base aux différents procédés photographiques en usage, car en incorporant l'iodure d'argent à l'albumine, à la gélatine, au collodion, on a les mêmes effets que sur le papier et en se servant d'autres sels ou d'autres matières réductrices, telles que l'acide pyrogallique, le protosulfate de fer, le phénomène de l'apparition de l'image se fait dans des conditions analogues. En somme, c'est toujours l'iodure, le bromure ou le chlorure d'argent qui sont les matières impressionnables, et les procédés des divers opérateurs, quoique pouvant donner des épreuves plus ou moins belles, sont fondés sur des réactions analogues à celle dont on vient de parler. Le but de cet ouvrage n'étant pas de présenter un traité de photographie, on se bornera à indiquer les principes généraux des méthodes les plus usitées, et surtout de celles qui sont fondées sur des réactions particulières au point de vue de l'action de la lumière. On pourra, pour de plus amples détails, consulter les nombreux traités de photographie publiés dans ces dernières années (1).

D'après ce qui a été dit plus haut, pour obtenir une épreuve photographique, il faut deux séries d'opérations bien distinctes :

La première comprend la formation de l'épreuve négative, c'est-à-dire du cliché;

(1) *Bullet. de la Société franç. de photographie.* — Barreswil et Davanne, *Chimie photographique.* — Davanne et Girard, *Recherches théoriques et pratiques sur les épreuves positives.* — Van Monckhoven, *Traité général de photographie.* — Id., *Traité d'optique photographique.* — Hardwich, *Manual of photographic chemistry.* — Th. Sutton, *The collodion process*, etc. — Sella, *Plico del fotografo*, etc., etc.

La deuxième, la formation de l'épreuve positive ou la reproduction de l'image de la chambre noire.

La première série d'opérations est la plus importante; la seconde, quoique étant en réalité un simple tirage, présente des difficultés, et demande à être très-bien exécutée.

La formation de l'épreuve négative ou du cliché comprend :

1° La formation de la couche sensible,

2° L'exposition à la chambre noire,

3° Le développement et quelquefois le renforcement de l'image,

4° Le lavage de l'épreuve et sa fixation.

La méthode de M. Talbot fut peu suivie pendant plusieurs années, et l'attention ne se porta principalement sur elle qu'après que M. Blanquart-Évrard eut indiqué, en 1847 (1), les précautions à prendre pour obtenir avec certitude de bons résultats. Le procédé qu'il décrivit est au fond le même que celui de M. Talbot et n'en est qu'un perfectionnement, car il ne signala aucune réaction nouvelle ; il opérait comme il suit :

Il déposait sur une feuille de papier une couche d'iodure d'argent mêlé de bromure, en plaçant d'abord une feuille de papier de façon à ce qu'elle posât seulement d'un côté sur une dissolution d'une partie d'azotate d'argent dans 30 parties d'eau, puis en laissant sécher ce papier et en le faisant plonger pendant une ou deux minutes dans une dissolution de 25 parties d'iodure de potassium, 1 de bromure de potassium et 560 d'eau ; en lavant la feuille de papier à l'eau distillée et en la faisant sécher, cette feuille de papier pouvait se conserver pendant longtemps.

Quand on voulait se servir de cette surface impressionnable, on versait sur une glace de verre quelques gouttes d'une dissolution de 6 parties d'azotate d'argent, 11 parties d'acide acétique et 64 d'eau (c'est-à-dire ce que l'on appelle de l'acéto-nitrate d'argent) et, dans l'obscurité, on appliquait contre le verre une feuille du papier sensible de façon à ce que la couche impressionnable fût en contact avec lui. On pressait le papier avec quelques doubles de papier buvard humide et une seconde glace, et on exposait le tout à la chambre noire de manière que la lumière vînt frapper la surface sensible au travers de la première glace. On voit que l'iodure d'argent avec excès d'azotate était impressionné par la lumière, et recevait une impression qui pouvait

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 24, p. 117, 1847.

être continuée à l'abri de la lumière. Lorsque la durée de l'action lumineuse était suffisante, on enlevait le papier impressionné, on le déposait sur une surface de verre ou de porcelaine, et on y versait un peu d'une dissolution saturée d'acide gallique dans l'eau; l'image apparaissait aussitôt. On fixait avec l'hyposulfite de soude ou le bromure de potassium, et l'on avait ainsi l'image négative ou le cliché, qui pouvait servir à donner, par transparence, avec un papier sensible de chlorure d'argent une épreuve positive.

Épreuves sur albumine, gélatine, collodion, etc. — Cette méthode a encore été modifiée et perfectionnée : on a imbibé le papier avec de la gélatine, de l'albumine, de la cire, de la paraffine, et l'on put alors opérer à sec, ce qui permit de reproduire aisément les paysages; aussi quelques voyageurs l'emploient-ils encore dans ce dernier cas, en raison de la facilité de transport des clichés. Cependant, le déplacement des fibres du papier lors de l'imbibition des liquides fit penser qu'il serait préférable, pour la netteté des images, d'obtenir les clichés sur des surfaces qui ne subiraient aucun changement par suite des lavages successifs que nécessitent les opérations; de là la photographie sur verre. On se servit d'abord d'une couche d'albumine déposée sur une glace (1) et à laquelle on incorporait le sel d'argent; on employa également la gélatine (2); mais depuis que l'on a fait usage du collodion (3) pour retenir sur le verre le composé d'argent impressionnable dont la réduction donne l'image de la chambre noire, la facilité avec laquelle le dépôt de cette substance s'opère même sur de grandes surfaces, la rapidité de la préparation et la beauté des épreuves ont fait généralement préférer cette méthode, qui est aujourd'hui presque exclusivement employée par les photographes.

On opère la plupart du temps quand la couche de collodion est encore humide; cependant, comme on le verra plus loin, on peut également s'en servir quand elle est sèche.

Pour préparer le pyroxyle (fulmi-coton) soluble dans l'éther et l'alcool, on traite le coton cardé par un mélange d'azotate de potasse et d'acide sulfurique; on peut employer le mélange :

(1) Niepce de Saint-Victor, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 26, p. 637, 1848.

(2) Poitevin, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 30, p. 647, 1850.

(3) M. Le Gray a indiqué en 1850 l'emploi du collodion, mais le principe de la méthode suivie actuellement a été donné, la même année, par MM. Fry et Archer.

Coton cardé,	30 gr.
Azotate de potasse,	540
Acide sulfurique ordinaire,	450

Quand la réaction a eu lieu, on lave le produit et on le sèche.

On forme alors la dissolution de collodion normal, qui peut se conserver assez longtemps sans s'altérer; pour cela, on mélange de l'alcool avec de l'éther, et l'on dissout le fulmi-coton; si l'on employait l'éther seul, l'évaporation serait trop rapide à la surface du verre. On a proposé un grand nombre de formules de collodion normal, et chaque photographe a pour ainsi dire la sienne. On indique ci-après plusieurs préparations mentionnées dans les traités de photographie :

Fulmi-coton. . .	2 gr.,5	Fulmi-coton. . .	1 gr.,5	Fulmi-coton. .	5 gr.
Éther à 58°. . .	200 c. c.	Éther.	100 c. c.	Éther.	300 c. c.
Alcool à 40°. . .	50 c. c.	Alcool.	30 c. c.	Alcool.	180 c. c.

Ces collodions, surtout les deux premiers, sont d'une évaporation rapide par suite d'une trop grande quantité d'éther; habituellement on emploie aujourd'hui, pour 10 parties de fulmi-coton,

Éther 600, Alcool 400 } ou { Éther 500, Alcool 500

Une petite quantité de la dissolution versée sur une glace tenue horizontalement et inclinée pour répandre le liquide sur toute la surface, donnerait par évaporation en quelques secondes une couche de collodion adhérent au verre; mais pour y incorporer un sel d'argent on a soin de mélanger au liquide un iodure ou un bromure, et ensuite, comme on va le voir, on forme par double décomposition le composé impressionnable d'argent. On a conseillé de dissoudre les iodures et les bromures de la plupart des métaux dans le collodion qui doit être déposé sur le verre; quoiqu'il ne paraisse pas probable que la nature de la base influe sur le degré de sensibilité du collodion, il paraît qu'on trouve les conditions d'hygroscopicité convenables dans l'usage des sels de cadmium, de sorte qu'au lieu d'employer les chlorures ou les iodures alcalins on peut avoir recours à ces sels.

On mélange ordinairement un bromure avec un iodure, et l'on met à peu près trois fois autant d'iodure que de bromure. Pour 100 cent. cubes des mélanges précédents on a proposé d'ajouter 1gr,25 d'iodure

de cadmium et quelques gouttes d'une solution de bromure de cadmium, ou bien $1^{gr.}$ d'iodure de zinc et $0^{gr.}30$ de bromure de cadmium. On fait dissoudre ces sels, et quand la dissolution est faite le collodion est prêt à être employé; on nettoie alors parfaitement la glace sur laquelle le dépôt doit s'opérer, et on verse lentement la quantité de collodion nécessaire pour couvrir sa surface; on rejette l'excès de liquide, et on attend quelques secondes, puis on plonge de suite cette glace recouverte de collodion encore humide dans un bain d'azotate d'argent.

Ce bain est formé par une dissolution de 7 à 8 parties d'azotate d'argent pur fondu, pour 100 parties d'eau; quelquefois, quand le bain n'a pas servi, on y ajoute une petite quantité d'iodure d'argent. Le bain d'argent se place dans une cuvette en gutta-percha à rebords relevés et dont les dimensions sont au moins deux fois celles de la glace. On soulève la cuvette de manière à laisser libre une place où l'on dépose la glace, et on ramène rapidement la cuvette dans la position horizontale, sans quoi des taches se manifesteraient plus tard sur les parties où l'écoulement du bain se serait arrêté. La couche de collodion avant son immersion paraît presque transparente, mais aussitôt plongée elle prend une couleur laiteuse, due à l'iodure et au bromure d'argent qui se forment par double décomposition; puis toute trace d'alcool provenant de la couche est bientôt éliminée de la dissolution, et on retire la glace en se servant d'un crochet en platine. La glace est alors recouverte d'une couche de collodion sensible et encore humide que l'on place au foyer de la chambre noire, comme on avait placé le papier sensible ou la plaque d'argent iodurée. Il est donc inutile d'ajouter ici que cette préparation doit être faite dans l'obscurité ou du moins dans la pièce éclairée seulement à l'aide de la lumière orangée ou jaune.

On a reconnu qu'il y avait avantage à se servir d'un mélange d'iodure et de bromure d'argent au lieu d'employer de l'iodure isolé; cependant, on pourrait incorporer au collodion une quelconque de ces trois substances, iodure, bromure ou chlorure. D'un autre côté, physiquement, au point de vue de la reproduction des images de la chambre noire, il y a avantage à employer du bromure, car on sait, comme on l'a vu page 85, que dans le spectre solaire le bromure d'argent est impressionné plus loin du côté du rouge que les deux autres composés, et dès lors des objets qui envoient des rayons de réfrangibilité moyenne peuvent produire une impression sur le bromure quand ils

n'en auraient donné qu'une plus faible sur l'iodure. Ainsi, par l'emploi du bromure d'argent on doit avoir plus de demi-teintes qu'avec l'iodure ou le chlorure de ce métal.

La durée de l'exposition de la glace collodionnée sensible au foyer de la chambre noire ne doit pas être plus longue que celle de la plaque daguerrienne bromurée, c'est-à-dire que cette surface est d'une très-grande impressionnabilité; mais rentrée dans l'obscurité et vue à la lumière rouge, de même que le papier sensible elle ne donne aucune apparence du dessin; il faut pour cela l'intervention d'un réactif, d'un sel réducteur, qui agit de la même manière que sur les papiers sensibles et continue l'action commencée par la lumière. L'acide gallique peut servir pour opérer cette réaction; mais comme l'effet produit est une réduction à l'état métallique du sel d'argent déjà impressionné, on pourrait employer la plupart des proto-sels tels que ceux de fer, de manganèse, ainsi qu'un certain nombre de matières organiques, car ces substances en s'oxydant aux dépens du sel d'argent conduiraient au même résultat. On emploie habituellement, en outre de l'acide gallique, l'acide pyrogallique, le protosulfate de fer ou le double sulfate de fer et d'ammoniaque. L'acide gallique, additionné d'azotate d'argent, donne de bons résultats. L'acide pyrogallique, dont l'emploi a été indiqué par M. V. Regnault, produit d'excellents effets, mais il agit trop vite, et en acidulant la dissolution aqueuse avec de l'acide acétique ou tartrique, on modère l'effet produit, et on le régularise. Le protosulfate de fer fait apparaître immédiatement l'image.

Quand on opère avec l'acide pyrogallique, on verse la dissolution sur la surface. Avec le protosulfate de fer on agit de même; on pourrait cependant opérer par immersion dans une cuvette qui renferme la dissolution. On a proposé de se servir d'un mélange d'acide gallique et de sulfate ferrugineux, mais cette dissolution est peu usitée; elle est ainsi composée :

Protosulfate de fer.	20 gr.
Eau.	100

On fait dissoudre, et on ajoute une dissolution formée comme il suit :

Acide gallique.	4 gr.
Acide acétique cristallisable.	5
Acide azotique, quelques gouttes.	

Quand le mélange a lieu, il se forme du gallate de fer s'il n'y a pas d'acide azotique dans le bain.

On peut aussi employer

Proto-sulfate de fer.	30 gr.
Eau.	420

En ajoutant à la dissolution,

Acide pyroligneux.	24 c. c.
Alcool.	8

On opère plus généralement aujourd'hui avec une dissolution de protosulfate de fer étendue formée de 100 parties d'une dissolution de protosulfate saturée à froid et 900 d'eau ou bien de 4 parties de sulfate cristallisé pour 100 d'eau. La dissolution étant acidulée préalablement, on la verse sur l'épreuve, et on laisse celle-ci apparaître.

Quoique le résultat final produit par ces diverses substances soit le même, c'est-à-dire que l'on ait de l'argent métallique, cependant les tons de l'image ne sont pas semblables, ce qui semble indiquer un état moléculaire différent du composé métallique réduit; ainsi avec l'acide gallique on a des noirs très-intenses; avec le protosulfate de fer, l'argent est réduit à l'état blanc.

Lorsque l'image négative est ainsi obtenue, on la lave à grande eau, puis on la plonge dans un liquide qui dissout l'iodure ou le bromure non décomposé, et qui la fixe. On se sert en général de l'hyposulfite de soude; quelquefois, on fait usage d'une dissolution contenant 3 parties de cyanure de potassium pour 100 d'eau; mais ce dernier liquide est fort actif et peut altérer les parties faibles des clichés dans le cas où on le laisserait agir pendant trop long temps : c'est pour ce motif que l'hyposulfite de soude est préféré. Maintenant que les sulfo-cyanures sont préparés industriellement en assez grande quantité, on commence à en faire usage pour le même but. Quand l'image est fixée, on la lave encore, puis on la laisse sécher.

Lorsque par un défaut de durée d'exposition à la chambre noire, le cliché n'a pas assez de ton, il faut chercher à lui donner plus d'opacité dans les parties qui ont été frappées par la lumière. On a vu précédemment, page 78, qu'en plongeant successivement la glace recouverte de collodion dans un bain d'azotate d'argent et dans un bain réducteur,

acide gallique ou pyrogallique, on fixait plus d'argent dans les parties les plus impressionnés, ce qui permettait d'atteindre le but désiré. On a également proposé d'attaquer la couche d'argent métallique qui forme le dessin négatif, et de la transformer en sulfure, chlorure, etc., ce qui la rend moins transparente. On emploie alors une faible dissolution de sulfhydrate d'ammoniaque, du bichlorure de mercure, ou d'autres substances. Quand le cliché est dans l'état que l'on juge le plus convenable, après l'avoir bien lavé et laissé sécher, on le couvre d'une très-légère couche de vernis, de sorte que par frottement on ne risque plus de le rayer ni de le détruire.

Épreuves sur collodion sec. — La méthode qui vient d'être décrite suppose que la glace est exposée au foyer de la chambre noire aussitôt après sa préparation, c'est-à-dire que l'on opère avec la surface collodionnée sensible humide. L'on a cherché à conserver à cette couche sa sensibilité pendant un temps plus ou moins long après sa préparation, afin de la rendre applicable à la production des vues dans les voyages. Plusieurs procédés ont été donnés successivement, soit en recouvrant le collodion sensibilisé d'une couche d'une substance hygroscopique, soit en l'enduisant de gélatine, d'albumine ou de résine. Parmi ces derniers procédés, qui avaient reçu le nom de procédés au collodion sec, on doit citer celui décrit par M. Taupenot (1), lequel est basé sur l'emploi d'une couche d'albumine, qui, bien que d'une manipulation délicate, avait donné de bons résultats. Mais depuis que M. Russel (2) a montré le parti que l'on pouvait tirer d'une couche de tannin pour atteindre facilement le même but, cette dernière préparation a été généralement préférée.

On opère alors comme il suit : la glace est recouverte de collodion et sensibilisée à la manière ordinaire; au sortir du bain d'azotate d'argent, elle est lavée avec soin à l'eau distillée, de manière à enlever tout l'azotate libre. On verse, sur la glace, une solution de tannin faite dans la proportion de 1 gramme de tannin pour 32 grammes d'eau, c'est-à-dire à peu près 3 pour 100 de tannin, et en quantité suffisante pour la couvrir; on laisse écouler l'excès de liquide, et l'on fait sécher la couche. L'opération doit être faite à l'abri de toute lumière et même,

(1) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 41, p. 383. — *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 1.

(2) *Bulletin de la Société franç. de photographie*, tomes 7, 9 et 10. Le procédé au tannin par M. C. Russel, *traduction* par M. A. Girard (1864).

si on faisait sécher la glace à l'aide d'un foyer embrasé, la lumière du foyer pourrait l'altérer.

Avec des glaces ainsi préparées, l'exposition, dans les circonstances égales, est six ou huit fois plus longue qu'avec des glaces préparées au collodion humide. Lorsqu'on veut procéder au développement de l'image, la glace est d'abord mouillée à l'eau distillée, puis on développe l'image avec l'acide gallique et l'azotate d'argent. La concentration du liquide qui fait apparaître l'image doit varier suivant les circonstances, mais en général une partie d'acide pyrogallique pour 300 d'eau suffit; on ajoute quelques gouttes d'une solution d'azotate d'argent, que l'on peut aciduler avec l'acide citrique. L'addition de ce dernier acide donne des tons noirs, et la substitution de l'acide acétique à l'acide citrique donne des tons rouges aux parties métalliques réduites.

§ 2. *Épreuves positives aux sels d'argent. Épreuves positives directes à la chambre noire.*

Épreuves positives aux sels d'argent. — La seconde série d'opérations destinées à produire les épreuves positives consiste essentiellement à placer au-dessous du cliché négatif une feuille de papier recouverte de chlorure d'argent et à presser les deux surfaces dans une presse semblable à celle indiquée dans la figure 58 représentée ci-contre; une des faces est une glace en verre, et se trouve cachée dans le dessin; le fond mobile qui presse contre cette glace est en bois garni de drap. On place d'abord dans l'obscurité le chiché négatif contre le verre, puis on applique la feuille de papier sensible contre le cliché, et on recouvre le tout d'une feuille de papier qui est pressée par le fond mobile; ce fond est appuyé à l'aide d'une fermeture à ressort dont le système est variable à volonté.

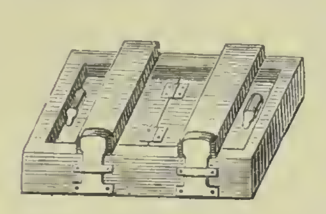


Fig. 58.

On expose alors le châssis à la lumière solaire ou à la lumière diffuse, suivant la force ou la faiblesse des clichés, et l'on regarde de temps à autre si le papier sensible qui dépasse le cliché est suffisamment noirci; on retire alors l'épreuve positive, on la baigne dans une dissolution d'hyposulfite de soude, qui dissout les parties non impressionnés et réagit sur le sel altéré en donnant de l'argent métallique, et on la plonge dans de l'eau ordinaire; l'épreuve positive

est alors fixée et peut rester à la lumière sans s'altérer. On peut changer et augmenter le ton de l'épreuve au moyen de diverses réactions chimiques, ce que les photographes appellent faire virer l'épreuve, et la production de l'image positive est terminée.

On voit, en résumé, que la série d'opérations pour la formation des épreuves positives au moyen d'un cliché négatif comprend :

1° La formation de la couche impressionnable,
2° La production de l'image,
3° Le lavage et la fixation de l'épreuve,
4° Le virage.

Mais dans l'exécution de cette partie du travail photographique il se produit des réactions qui font souvent varier la coloration, la netteté, l'intensité et la solidité de l'image; MM. Davanne et Girard (1) ont montré quels sont les principaux effets que l'on observe et quelles sont les précautions à prendre pour éviter les circonstances diverses qui seraient contraires à la bonne exécution des épreuves.

Examinant d'abord l'influence de l'encollage du papier, ils ont reconnu que cette préparation est cause des diverses colorations que les épreuves présentent, et ils pensent qu'au moment de l'action de la lumière l'influence de la matière organique se fait sentir, de sorte que le phénomène n'est plus le même que si le chlorure d'argent était isolé. D'après leurs observations, tous les papiers bien fabriqués peuvent être employés pourvu qu'ils soient fortement encollés. On se sert de gélatine et très-fréquemment d'albumine qui permet d'avoir des dessins d'une grande finesse.

On pourrait fixer sur le papier un sel d'argent impressionnable autre que le chlorure, et faire usage de bromure ou d'autres composés que la lumière colore ; mais la pratique a montré que le chlorure donnait de meilleurs résultats. Pour le produire on place la feuille de papier à la surface d'une dissolution de 5 grammes de chlorure de sodium dans 100 grammes d'eau, et on la laisse sécher ; on la plonge alors, quand elle est sèche, dans de l'eau contenant 15 à 20 pour 100 d'azotate d'argent. Souvent on dépose sur le papier la couche d'albumine en même temps que le chlorure alcalin ; on emploie alors une dissolution de 4 à 5 grammes

(1) *Recherches théoriques et pratiques sur la formation des épreuves photographiques positives*, par MM. Davanne et Girard (1864). — *Bulletin de la Société française de photographie*, tomes I à X.

de sel marin (ou de chlorhydrate d'ammoniaque) dans 100 grammes d'albumine. On avait remarqué que les divers chlorures employés pour préparer le chlorure d'argent par double précipitation donnaient des colorations diverses : MM. Davanne et Girard ont montré que ces effets provenaient de l'état d'acidité ou d'alcalinité des bains, ainsi que des matières étrangères qu'ils pouvaient contenir, car les chlorures purs dont ils ont fait usage leur ont donné les mêmes résultats.

Il est important, suivant les mêmes observateurs, que l'azotate d'argent soit en excès en présence du chlorure, car lors de la réduction du chlorure le chlore émis forme avec l'azotate une nouvelle quantité de chlorure qui est à son tour décomposé, de sorte que les noirs sont plus intenses que si le chlorure seul eût été décomposé.

Il n'y a que peu d'observations à faire sur la production de l'image, le temps pendant lequel la lumière agit dépendant de la transparence du cliché et de l'intensité lumineuse active. Quant à la fixation de l'image, elle peut présenter des effets qui ont été analysés par MM. Davanne et Girard et d'après lesquels la conservation des épreuves est plus ou moins bonne. Habituellement on se sert d'hyposulfite de soude; si ce liquide est exempt d'hyposulfite d'argent, c'est-à-dire s'il n'a pas dissous de sel d'argent, et que le papier n'ait pas d'acide azotique en excès, le lavage ne laisse que de l'argent métallique sur le dessin. Mais lorsque ces conditions ne sont pas remplies, l'hyposulfite d'argent est décomposé, et il se forme une plus ou moins grande proportion de sulfure de ce métal à la place d'argent métallique. Ce sulfure, s'il était anhydre et sec, serait fortement coloré; mais en présence de l'humidité et des matières organiques il devient jaune pâle, et cause la décoloration des épreuves photographiques qui n'ont pas été virées. MM. Davanne et Girard pensent que cette teinte jaune est due à une espèce de combinaison ou de laque entre le sulfure d'argent et la matière organique, combinaison probablement hydratée.

On a proposé encore pour fixer les images de faire usage de cyanure de potassium et dans ces derniers temps, comme on l'a déjà dit plus haut, de sulfocyanure d'ammonium (1); mais généralement on se sert d'hyposulfite de soude, comme pour les épreuves négatives.

Lorsque l'épreuve positive est fixée, pour lui donner les meilleures conditions de stabilité possible et changer sa teinte en lui donnant

(1) Proposé par M. Meynier, *Bull. de la Société franç. de phot.*, t. 11, p. 179.

des tons plus ou moins violets ou bruns, on procède au virage, c'est-à-dire à la substitution d'un métal tel que l'or ou le platine à une partie de l'argent qui forme les noirs du dessin. Ce métal ne peut plus subir les mêmes altérations que l'argent, et l'épreuve n'a plus les mêmes chances de détérioration. Ce virage se fait par double décomposition, en plongeant le dessin dans une dissolution d'or ou de platine; généralement, on se sert d'un sel d'or. Il se produit une action analogue à celle qui a lieu quand on plonge une lame d'argent dans une dissolution d'or; de l'argent est dissous, et de l'or se précipite en quantité équivalente.

On s'est servi de dissolutions diverses; en général les bains acides doivent être rejetés, mais on emploie avec avantage une dissolution d'un double chlorure d'or neutre, tel que le double chlorure d'or et de potassium, ou du double hyposulfite d'or et de soude dont on a parlé antérieurement, page 174. Ces dissolutions sont prises de façon qu'il y ait 4 à 5 parties de sel pour 1,000 grammes d'eau. On peut employer également des bains alcalins.

Quelquefois on procède au virage en même temps qu'à la fixation, ou même avant; parmi les dissolutions qui ont été proposées on peut citer les suivantes : On dissout 3 grammes de chlorure d'or dans 1,000 parties d'eau, puis 12 grammes de bi-carbonate ou d'acétate de soude dans la même quantité de liquide, et on mélange les deux dissolutions; ou bien : on dissout dans 2,000 parties d'eau, 10 parties d'acétate de soude, 6 de chlorure de chaux et 2 à 4 parties de chlorure d'or. Avec une dissolution contenant peu d'or, l'action est plus lente et plus facile à suivre, et l'effet obtenu est meilleur.

Les procédés de virage par les sels d'or, de platine ou de métaux non altérables sont les seuls dont on doive faire usage, et il n'y a pas à s'arrêter à l'emploi des sulfures ou hyposulfites que l'on avait employés antérieurement, et qui, donnant lieu à du sulfure d'argent, présentaient bien une coloration assez intense dans les premiers temps, mais ne tardaient pas à manifester l'altération signalée plus haut; cette altération en effet est propre à l'argent sulfuré en présence des matières organiques quand il est exposé à l'humidité.

Images positives directes. — Les méthodes décrites ci-dessus ne donnent pas immédiatement les images de la chambre noire, et exigent la formation préalable du cliché ou épreuve négative, mais elles ont l'avantage de fournir autant d'épreuves positives que l'on désire; aussi ces mé-

thodes sont-elles presque exclusivement employées. Néanmoins, dans quelques circonstances, il peut être intéressant d'avoir immédiatement une image positive du dessin de la chambre noire. Plusieurs procédés ont été indiqués; l'un est dû à M. Bayard (1), et repose sur l'action exercée par l'iodure de potassium sur un papier préalablement recouvert de sel d'argent et noirci à la lumière, action qui est telle que sous l'influence des rayons lumineux le papier se décolore; mais cette méthode n'est pas en usage.

Un autre procédé est du à M. A. Martin (2); il consiste à recouvrir une glace d'une couche de collodion assez mince à la manière ordinaire et à l'exposer au foyer de la chambre noire; on la plonge ensuite dans une dissolution de protosulfate de fer au lieu de la traiter par l'acide gallique ou pyrogallique; puis on fixe l'image avec une dissolution de cyanure de potassium. L'action réductrice du protosulfate de fer donne lieu à un dépôt d'argent blanc, et en plaçant la lame de verre sur un fond noir, comme par exemple du velours noir, l'image obtenue est immédiatement positive, c'est-à-dire reproduit les clairs et les ombres de l'image de la chambre noire. On peut opérer sur toile cirée ou sur toute autre surface dont le fond noir forme contraste avec le dépôt blanc de l'argent réduit par le sel de protoxyde de fer.

§ 3. *Épreuves positives diverses. Épreuves au charbon, ou avec des poudres inaltérables.*

La formation des clichés négatifs permet d'obtenir des épreuves positives avec des substances suffisamment impressionnables que l'on peut incorporer au papier ou déposer à sa surface; aussi pourrait-on se servir d'un certain nombre de substances dont il a été question dans le livre II, page 66 et suiv., telles que des combinaisons de métaux qui ont plusieurs degrés d'oxydation, comme le fer, l'urane, l'or, le platine, etc.; ces composés, en effet, par des réactions ultérieures, pourraient donner des nuances diverses aux épreuves suivant la nature et l'état physique du métal ou de la substance formant les ombres. Les composés de fer surtout sont d'un emploi facile pour ce genre d'épreuves; on peut citer parmi les recherches faites sur ce sujet celles de M. J. Her-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 10, p. 337 (1840). — M. Lassaigne avait observé de son côté la réaction de l'iodure de potassium sur le papier noirci: voir *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 8, page 547 (1839), et t. 10, p. 474 (1840).

(2) *Idem.*, t. 35, p. 29 (1852).

schell (1), de M. Poitevin (2), de M. le duc de Luynes (3), de MM. Reynolds et Phipson (4), etc....

Cependant, les images positives obtenues de cette manière n'offrent pas toute la garantie de stabilité désirable, et M. le duc de Luynes, dans sa sollicitude pour les progrès de la photographie, proposa en 1856 un prix d'après un programme dont les bases, ainsi que le jugement du concours, furent arrêtées par la Société française de photographie (5). Ce prix fut divisé en deux : l'un, de 8,000 francs, pour l'auteur ou les auteurs qui auraient reproduit par la lithographie ou la gravure, sans l'intervention de la main, les merveilles de la photographie ; l'autre, de 2,000 francs, destiné à récompenser l'auteur ou les auteurs qui dans une période de deux années auraient fait faire le plus de progrès au tirage des épreuves positives et à leur conservation. Nous aurons occasion de revenir sur le premier prix dans le chapitre suivant ; il ne sera question ici que du second.

Parmi les considérants du rapport fait par M. V. Regnault se trouve un passage que l'on doit citer : « Le carbone est de toutes les matières que « la chimie nous a fait connaître la plus fixe et la plus inaltérable à l'ac- « tion de tous les agents chimiques aux températures de notre atmos- « phère..... La conservation des anciens manuscrits nous prouve que le « charbon fixé sur le papier à l'état de noir de fumée se conserve sans « altération pendant bien des siècles. Il est donc évident que si l'on par- « venait à produire les noirs du dessin photographique par le charbon, « on aurait pour la conservation des épreuves la même garantie que « pour nos livres imprimés, et c'est la plus forte que l'on puisse espé- « rer et désirer. »

Ces prix, qui avaient pour but de stimuler le zèle des personnes se livrant aux recherches photographiques, remplirent parfaitement le but que s'était proposé son auteur, et sans aucun doute ont exercé une certaine influence sur les procédés qui ont été publiés dans ces dix dernières années. M. Poitevin, en 1855 (6), en même temps

(1) *Philosoph. transact.*, 1842, t. 132, 2e partie, p. 181.

(2) *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 5, p. 157. — *Traité de l'impression photographique sans sels d'argent*, page 140.

(3) *Bulletin de la Société franç. de photographie*, t. 5, p. 305 et 337.

(4) *Id.*, t. 8, p. 75 et 79.

(5) *Id.*, t. 2, p. 192 et 214.

(6) *Id.*, t. 5, p. 121. — Poitevin, ouvrage cité plus haut, p. 69 et suiv. — *Annales du Conserv. impérial des arts et métiers*, t. 3, p. 169.

qu'il s'occupait d'appliquer à la lithographie l'action exercée par la lumière sur les matières organiques mélangées à l'acide chromique (voir page. 207), cherchait à obtenir directement sur papier des épreuves avec des poudres diverses (charbon, sanguine, etc.), ou bien avec de l'encre grasse. Quelques épreuves de ce genre furent assez satisfaisantes pour être admises en 1855 à l'exposition universelle. A cette époque, M. Poitevin opérait de deux manières :

1° Il recouvrait le papier d'un mélange analogue à celui qu'il déposait sur la pierre lithographique comme on le verra plus loin, et, après l'action préalable de la lumière au travers d'un cliché négatif, il appliquait, avec un tampon, de l'encre grasse sur le papier; l'encre grasse ne restait adhérente qu'aux parties devenues insolubles, et par conséquent lorsqu'on lavait le papier avec de l'eau, la surface présentait un dessin positif.

2° Il appliquait sur le papier une couche uniforme d'un mélange de bichromate de potasse et d'albumine, ou de gélatine, unie à une substance colorante en poudre telle que le charbon. Après la dessiccation de cette couche dans l'obscurité, si l'on impressionnait le papier pendant quelques minutes à la lumière sous le cliché négatif, et qu'on vînt à le laver à l'eau ordinaire, froide ou tiède, suivant la matière organique employée, on trouvait que les parties non impressionnées se dissolvaient, et que le dessin en couleur inaltérable apparaissait retenu et emprisonné par la matière organique devenue insoluble dans toutes les parties qui avaient subi l'action de la lumière, et cela dans la proportion de l'intensité lumineuse active.

Ces principes et surtout ceux de la seconde méthode ont servi de points de départ à divers procédés publiés depuis; aussi la Société française de photographie, à la suite d'un rapport, décerna-t-elle une médaille d'or à M. Poitevin pour les recherches qu'il avait entreprises dans cette direction.

En 1860, M. Fargier vint utiliser les couches épaisses formées avec un mélange de gélatine de bichromate de potasse et de poudre de charbon, pour obtenir des impressions très-belles, mais d'un emploi difficile en raison de la manipulation du procédé; en effet, le perfectionnement apporté par M. Fargier au procédé de M. Poitevin consiste en ce que, après avoir opéré sur le mélange en question et l'avoir impressionné au travers d'un cliché négatif, comme on l'a dit plus haut, on coule sur la surface impressionnée une couche épaisse de collodion, puis on plonge la surface

dans un bain d'eau chaude, qui dissout la gélatine non solidifiée formant le dessous de l'image comme l'avait remarqué antérieurement M. l'abbé Laborde (1); celle au contraire qui est devenue insoluble, et qui retient des particules de noir formant les ombres à la partie supérieure du dessin, reste adhérente à la pellicule de collodion qui nage dans le liquide. On fixe ensuite cette couche de collodion sur du papier gélatiné. Ainsi la couche non altérée par la lumière est dissoute par dessous l'épreuve, et c'est à l'aide du collodion qui sert à relier toutes les parties de l'image que cette opération peut avoir lieu. M. Swan, au moyen de plusieurs manipulations, que nous ne décrirons pas ici (2), a perfectionné ce procédé, qui est devenu très-pratique; aussi peut-on en faire usage pour avoir de très-belles épreuves, qui rendent aussi bien le dessin de la chambre noire que les images positives obtenues avec les mêmes clichés au moyen des sels d'argent.

Les changements d'hygroscopicité de plusieurs sels peuvent conduire également à la formation d'épreuves dans lesquelles le carbone ou des composés inaltérables forment les ombres. M. J. Herschell avait observé (3) qu'une feuille de papier imprégnée d'ammonio-citrate de fer devenait sec et imperméable à l'eau dans les endroits frappés par la lumière. MM. Garnier et Salmon (4) ont remarqué également qu'un mélange de sucre et de bichromate de potasse, qui est hygroscopique dans les conditions ordinaires, perd cette propriété par l'influence lumineuse, de sorte que du carbone peut adhérer à la surface d'une feuille de papier recouverte de ce mélange avant l'influence lumineuse, et ne pas présenter d'adhérence après. Ils ont basé sur cet effet un moyen d'obtenir des épreuves positives. Pour opérer, ils font dissoudre 30 grammes de sucre blanc dans 30 grammes d'eau; après dissolution, ils ajoutent 7 grammes et demi de bichromate d'ammoniaque et 10 grammes d'albumine battue. La dissolution sert à recouvrir un papier qui, desséché et mis sous un cliché pendant un temps suffisant, est rapporté dans une chambre noire. On promène sur sa surface, à l'aide d'un blaireau, de la poudre de charbon, qui adhère de préférence sur les parties non altérées par la lumière. Des lavages à l'eau froide, puis à l'eau tiède,

(1) *Bulletin de la Société franç. de photographie*, t. 4, p. 216.

(2) Davanne, *Annuaire photographique* pour 1868. — *Bulletin de la Société franç. de photogr.*, t. [illegible], p. 66, 1868.

(3) Poitevin, ouvrage cité, p. 174.

(4) *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 5, p. 135.

enlèvent la couche non altérée, et une dissolution d'acide sulfureux décolore les parties altérées renfermant de l'oxyde hydraté de chrome. Quand le papier est sec, l'épreuve est obtenue. Mais par ce procédé les demi-teintes laissent à désirer, et les clairs retiennent presque toujours du carbone.

M. Poitevin (1), à l'aide d'une réaction du même ordre mais tout à fait différente, est parvenu à une autre méthode de formation d'épreuves positives inaltérables, qui ont l'avantage d'être obtenues sur papier ou de pouvoir être déposées sur verre, sur émail ou sur un support quelconque. Cette méthode est basée sur ce fait qu'un mélange de perchlorure de fer et d'acide tartrique, étendu sur du papier, n'est pas hygroscopique, mais qu'il le devient rapidement lorsque la lumière vient le frapper. C'est donc précisément l'effet contraire de celui qu'éprouve l'ammoniocitrate de fer, ainsi que le mélange de sucre et de bichromate d'ammoniaque ou de potasse dont il vient d'être question.

Pour opérer, on fait une dissolution de 110 grammes de perchlorure de fer ordinaire dans $\frac{1}{2}$ litre d'eau et une autre de 40 grammes d'acide tartrique dans la même quantité d'eau, puis on les mélange et on conserve le liquide obtenu dans l'obscurité. Ce liquide est étendu sur une lame de verre ou sur une glace tenue horizontalement ; quand la surface en est mouillée, on incline la glace et on la laisse sécher dans une pièce obscure bien sèche ; si cette pièce est échauffée, deux ou trois heures suffisent ; dans le cas contraire, il faut une journée. Une fois desséchée ainsi à l'abri de la lumière, la couche amorphe forme un vernis sec et non hygroscopique. On place alors cette glace au-dessous d'un cliché, dans un châssis destiné au tirage des épreuves positives, et on expose le tout à la lumière pendant le temps nécessaire pour obtenir une épreuve positive ordinaire au chlorure d'argent.

Quand on retire la glace du châssis, on aperçoit le dessin se détachant en blanc sur le fond jaune du reste de la surface ; on le laisse à l'abri de la lumière prendre la température ambiante, et il s'humecte aux dépens de l'eau atmosphérique dans toutes les parties qui ont reçu l'action de la lumière. On passe alors sur sa surface, à l'aide d'un pinceau très-doux, une poudre charbonneuse ou autre ; on voit aussitôt apparaître le dessin, le charbon ou la matière pulvérulente très-divisée ne se fixant

(1) *Bulletin de la Société française de photographie*, t. 6, p. 212 et 304. — Poitevin, ouvrage déjà cité, p. 149.

que sur les endroits impressionnés, et en quantité à peu près proportionnelle à la quantité de lumière qui a traversé le cliché.

Lorsque l'épreuve est obtenue avec les précautions nécessaires, on peut la conserver ainsi en la vernissant. Si au lieu de charbon ou de couleur végétale on emploie des oxydes métalliques ou des émaux en poudre, on peut faire fondre dans une moufle ces corps colorants, et ils forment à la surface du verre un dessin inaltérable ; on opérerait de la même manière sur porcelaine. Pour avoir, dans ce cas, des noirs très-intenses, il faut faire usage de composés d'iridium.

Dans le cas où l'épreuve obtenue sur verre doit être reportée sur papier, on verse sur sa surface immédiatement après la fixation du carbone une couche de collodion, et on la baigne dans de l'eau légèrement acidulée par l'acide chlorhydrique, pour enlever toute trace de sel de fer. On applique ensuite sur la surface collodionnée lavée et encore humide une feuille de papier, dont on établit le contact parfait avec le collodion au moyen d'un pinceau plat en blaireau. Si l'on veut que cette feuille de papier soit celle sur laquelle l'image doit rester, on s'arrange pour qu'elle soit gélatinée, et on la laisse sécher sur le verre ; l'épreuve se détache d'elle-même ; dans ce cas, l'image se trouve avoir le même sens que le négatif, ou être en sens inverse des objets. Lorsque l'on désire au contraire que l'épreuve positive au charbon soit dans le sens du modèle du cliché, le papier humide que l'on applique contre le collodion doit être du papier ordinaire, mais de dimensions un peu moindres que celles de la glace portant l'image ; on ramène tout autour, sur les bords de ce papier, les parties de la couche de collodion qui dépassent cette feuille, et on la soulève avec soin par l'un de ses coins ; elle emporte le collodion, ainsi que l'image, qui est ensuite appliquée sur une feuille de papier gélatiné un peu plus grande que celle qui a servi à enlever le dessin. L'image une fois desséchée se trouve alors dans le même sens que celui des objets qui ont donné le cliché négatif. Ces opérations se font avec facilité.

Il est facile de comprendre d'après cela comment à l'aide des différents principes énoncés dans ce paragraphe, ainsi que dans le précédent, on a pu obtenir des épreuves positives sur émail ou sur verre avec différentes substances vitrifiables (1).

(1) M. Lafon de Camarsac, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 40, p. 1266. —

§ 4. *Photographie des astres. Action des lumières artificielles.*

Les images de la lune et des planètes peuvent être aisément obtenues à l'aide des procédés photographiques qui viennent d'être décrits, et permettent d'étudier un grand nombre de questions scientifiques du plus haut intérêt.

On conçoit de quelle importance sont pour l'astronomie ces dessins qui représentent la position des astres pendant les éclipses ainsi que les effets lumineux qui les accompagnent, dessins qui permettent de transmettre, pour les conserver et les étudier, les images de ces phénomènes passagers qu'on était réduit à observer d'une manière fugitive.

Il est également important d'avoir des images des astres, qui, observés à des intervalles déterminés, servent à reconnaître quels sont les changements qui peuvent se produire sur leur surface ; déjà, par une étude attentive des taches du soleil, on sait que l'apparition de ces taches est un phénomène périodique, et au moyen des images photographiques obtenues à certaines périodes, et comparées entre elles, on aura des éléments utiles pour savoir quels sont les mouvements qui ont lieu dans la photosphère.

Parmi les savants et les astronomes qui se sont occupés de ces questions, et qui ont obtenu des images des astres, on peut citer en France MM. Foucault, Aimé Girard, en Italie le père Secchi, en Angleterre M. Warren de la Rue, et en Amérique M. Rutherfort (1). M. Warren de la Rue depuis plusieurs années s'est livré à ce genre de recherches; il a fait élever un observatoire dans lequel un télescope à réflexion de 13 pouces d'ouverture (35 centim. environ), permet de prendre des épreuves photographiques des astres. Les images négatives de la lune obtenues à l'aide de cet appareil ont plusieurs centimètres de diamètre; ensuite, avec des moyens d'amplification on peut obtenir des épreuves positives trois ou quatre fois plus grandes, ce qui permet d'en saisir beaucoup mieux les détails. Celles du soleil ont à peu près la même dimension; les épreuves des planètes telles que Mars, Jupiter, Saturne sont également très-belles.

Bullet. de la Société franç. de phot., t. 5, p. 241. — MM. Tessié du Motay et Maréchal, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 60, p. 1239. — *Bulletin de la Société franç. de phot.*, t. 11, p. 175. — Poitevin, ouvrage déjà cité.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 46, 47, 53, etc. — *Reports of brit. Assoc.* (1859), p. 152. — *Philosophical transactions*, t. 152, part. 1, page 383, etc.

M. Warren de la Rue à l'aide de ces impressions photographiques a pu réaliser une idée très-originale : la distance des planètes à la terre est telle que les images apparaissent toujours comme des figures plates sans relief. On ne pourrait appliquer là les principes de la stéréoscopie, car sur la surface terrestre on ne trouverait pas deux stations assez distantes pour donner l'angle visuel nécessaire afin que les deux épreuves photographiques produisissent la sensation de relief dans un stéréoscope. Mais au lieu de faire varier le point de vue il a fait varier, dans le même lieu, l'instant de l'observation de quelques heures ou de plusieurs mois, suivant les astres à représenter; pour la planète Mars, par exemple, deux heures donnent une rotation d'une trentaine de degrés ; pour la lune la libration est telle qu'au bout d'un temps qu'on peut calculer, l'observateur la voit un peu plus de côté qu'elle ne se trouvait auparavant; deux épreuves étant ramenées à avoir la même dimension peuvent donc se trouver l'une par rapport à l'autre dans les mêmes conditions que deux épreuves stéréoscopiques ordinaires, et placées dans un stéréoscope donner la sensation de relief.

Dans ces diverses circonstances, la lumière active sur les substances impressionnables est la lumière solaire réfléchie par les planètes, et les conditions d'intensité seules règlent le temps nécessaire pour la production des épreuves, si l'on compare ce temps à celui qui est nécessaire pour la formation des images photographiques ordinaires. Quant aux lumières artificielles dont on peut se servir pour la production des images de la chambre noire, elles agissent non-seulement en raison de leur intensité, mais surtout en raison de leur composition et de la plus ou moins grande quantité de rayons très-réfrangibles qu'elles renferment; on a vu en effet dans le livre précédent, page 79 et suivantes, que les rayons les plus réfrangibles sont ceux qui exercent l'action chimique la plus énergique pour colorer les sels d'argent. Il n'est donc pas nécessaire de revenir de nouveau sur ce sujet, et il suffira de rappeler ici que parmi les lumières artificielles dont on peut se servir avec avantage en photographie, on doit placer la lumière de l'arc voltaïque ainsi que celle qui résulte de la combustion du magnésium, et, dans quelques cas peut-être, la lumière provenant de la combustion du sulfure de carbone.

CHAPITRE III.

Gravure photographique et litho-photographie.

§ 1. *Gravure photographique.*

Gravure par action des acides. — On a vu dans le paragraphe 1er, page 168, que Nicéphore Niepce, dès le début de ses recherches photographiques sur le bitume de Judée, avait porté son attention sur l'application que l'on pouvait en faire à la reproduction photographique des gravures ; en effet, le bitume de Judée dont étaient recouvertes les planches métalliques s'oxydait aux dépens de l'oxygène de l'air sous l'influence de la lumière, devenait insoluble ou plutôt moins soluble dans ses dissolvants ordinaires, et, formant les réserves, permettait de faire attaquer les planches métalliques par les acides. Les essais de gravure faits à cette époque montrent, par l'abscence des demi-teintes, que cette méthode s'appliquait principalement à la reproduction des gravures au trait.

M. Niepce de Saint-Victor (1) prépara la couche de bitume impressionnable, en dissolvant 2 pour 100 de cette substance dans un mélange de 9 parties de benzine et de 1 partie d'essence de citron, en déposant un peu de ce liquide à la surface de plaques d'acier, et en laissant évaporer les huiles essentielles ; il reconnut à cette couche une plus grande sensibilité qu'au bitume étalé au rouleau, et fit, avec M. Lemaître, plusieurs planches gravées sur lesquelles le bitume, devant former réserve, était impressionné derrière une épreuve positive. Après le lavage dans un mélange de 5 parties d'huile de naphte pour 1 de benzine, ou d'un autre dissolvant, ils opéraient une première morsure à l'acide azotique étendu, puis ils couvraient la plaque d'acier d'un peu de poussière de résine (ce que l'on appelle en terme de graveur un grain de résine), après quoi ils continuaient à faire attaquer la plaque.

M. Ch. Nègre (2) a apporté à l'emploi du bitume de Judée des mo-

(1) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 36, p. 908 ; t. 37, p. 667 ; t. 39, p. 618 ; t. 40, p. 584.

(2) *Bulletin de la Société franç. de photogr.*, t. 2, p. 334 ; t. 3, p. 58 ; t. 13, page 40. — Rapport sur le prix fondé par M. le duc de Luynes, *Bulletin de la Société*, t. 13, p. 94.

difications importantes, qui lui ont permis d'obtenir des résultats remarquables; il se sert d'un cliché négatif, et une fois la couche de bitume impressionnée et lavée, les parties sur lesquelles le bitume reste correspondent aux lumières de l'épreuve négative, c'est-à-dire aux ombres de l'image, et doivent être creusées sur la plaque d'acier. Pour atteindre ce but, au moyen d'un courant électrique et d'une dissolution de double cyanure d'or et de potassium on dépose de l'or sur la surface d'acier, qui ne prend la dorure que sur les parties découvertes, parties qui doivent être préservées de l'action des acides; en outre, au lieu de former une réserve continue, le bitume se laisse pénétrer par la dissolution d'or, et il se forme une espèce de réseau, qui lors de l'action de l'acide donne ce que l'on nomme un grain sur l'image. Cette dorure étant faite, on enlève le bitume à l'aide d'essence de térébenthine ou de benzine, et l'on peut faire attaquer la planche après y avoir déposé encore par endroits de la poussière de résine si cela est nécessaire; les parties dorées forment les blancs de l'épreuve.

Cette méthode a donné, entre les mains de M. Ch. Nègre, de très-beaux spécimens de planches gravées. Une des difficultés que présente l'emploi du bitume comme substance photographique, vient de ce que cette matière n'acquiert pas une insolubilité absolue par l'influence lumineuse; elle n'est rendue que moins soluble dans les essences, et dans cet état les dissolvants du bitume finissent par l'enlever si l'action dure trop longtemps; c'est donc par l'habitude d'opérer que l'on peut arriver à laver rapidement la surface impressionnée de façon à laisser les réserves nécessaires.

Il faut parler maintenant des autres procédés de gravure qui ont été proposés, et qui s'ils n'ont pas donné des résultats pouvant être appliqués dans les arts présentent cependant des réactions intéressantes à connaître. Après la découverte de Daguerre, on songea aussitôt à graver sur la lame de plaqué d'argent l'image de la chambre noire qui était rendue avec tant de perfection, et plusieurs procédés furent successivement proposés. Parmi les personnes qui se sont occupées de ce sujet, on peut citer M. Donné, M. Grove, qui attaquait la plaque d'argent recouverte du dessin au pôle positif d'une pile, et M. Fizeau (1), dont le procédé consistait à faire mordre la plaque daguerrienne par l'eau régale (acide azotique additionné d'un chlorure ou d'acide chlorhydrique). Ce mé-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 16, p. 408; t. 19, p. 119.

ange attaque l'argent qui forme les noirs du dessin, tout en respectant les blancs composés d'amalgame d'argent. Après une première action de l'eau régale, M. Fizeau réservait la partie creusée et attaquée, au moyen d'une huile siccative, et recouvrait d'or les blancs par un dépôt électro-chimique ; ces parties réservées étaient alors plus résistantes, et l'on pouvait de nouveau creuser l'argent par l'action des acides. Ces planches d'argent ne pouvaient être soumises qu'à un tirage restreint, en raison du peu de résistance du métal ; on pourrait maintenant, par un dépôt de fer analogue à celui que l'on forme sur les plaques gravées, augmenter la dureté de la couche superficielle, et l'on obtiendrait un plus grand nombre d'épreuves.

M. Poitevin (1), en cherchant à reproduire par la gravure les images daguerriennes, observa plusieurs faits nouveaux, et entre autres le suivant : quand la lame de plaqué a été exposée à la vapeur de mercure et que le dessin est apparu, alors, sans dissoudre l'iodure d'argent non altéré, si l'on attache cette lame au pôle négatif d'une pile composée d'un petit nombre d'éléments, et qu'on la plonge dans un bain saturé de sulfate de cuivre en regard d'une plaque de cuivre, presque aussitôt le dépôt électro-chimique du cuivre a lieu, mais seulement sur les parties métalliques amalgamées, c'est-à-dire sur les blancs du dessin, et l'image apparaît en rouge par suite du dépôt cuivreux. Cette opération terminée, on lave la lame à l'hyposulfite de soude, on la chauffe pour oxyder le cuivre, et par des dépôts successifs d'or et de mercure on peut arriver à faire mordre certaines parties de la lame daguerrienne.

Ce dépôt galvanique de cuivre jouit également de propriétés dont l'observation a été pour M. Poitevin le germe des procédés de photolithographie dont il sera question plus loin. L'une consiste en ce qu'à la sortie du bain de sulfate de cuivre la plaque lavée et légèrement gommée, puis essuyée pour enlever l'excès de liquide, peut être encrée avec un rouleau chargé d'encre grasse ; le corps gras dans ce cas n'adhère qu'aux noirs du dessin, c'est-à-dire aux parties où existe la pellicule d'iodure d'argent qui les a préservés du dépôt de cuivre, tandis que cette encre n'adhère pas aux parties cuivrées. L'autre propriété consiste en ce que les plaques recouvertes du dépôt partiel de cuivre, que l'on oxyde ensuite, lorsqu'elles sont amalgamées dans les endroits où

(1) *Comptes rendus de l'Acad., des sciences*, t. 27, p. 13. — Poitevin, *Impression photographique sans sels d'argent*, p. 15.

l'argent est resté à nu, peuvent être encrées avec un rouleau chargé d'encre grasse : dans ce cas, l'encre ne prend que sur les parties où l'oxyde de cuivre existe, tandis que la surface de mercure n'en est pas mouillée.

M. Talbot (1), pour faire des gravures à l'eau-forte sur les plaques d'acier, a utilisé comme réserve sur ces plaques l'insolubilité que l'acide chromique communique aux matières gélatineuses sous l'influence de la lumière. Le procédé qu'il a donné consiste à recouvrir une plaque d'acier avec un mélange de gélatine et de bichromate de potasse; ce mélange une fois sec est impressionné au travers d'un cliché positif; les parties frappées par la lumière deviennent insolubles; après le lavage, on fait mordre la plaque avec du chlorure de platine ou de fer, et les réserves ne sont pas altérées. Mais ce procédé ne permet pas de creuser fortement la plaque, et quoique donnant des finesses de détails ne rend pas suffisamment les demi-teintes.

MM. Garnier et Salmon (2) ont indiqué les réactions suivantes comme pouvant donner des impressions de gravure : des lames de laiton iodurées, placées sous un cliché positif à l'influence de la lumière, donnent une impression qui est telle que si l'on promène sur la surface un tampon imbibé de mercure, les parties correspondantes aux clairs de l'épreuve refusent de s'amalgamer, celles au contraire qui correspondent aux parties opaques se dessinent en blanc par l'amalgame. Si l'on passe sur la plaque un rouleau d'encre grasse, le mercure ne prend pas l'encre, et celle-ci n'adhère que sur les parties influencées par la lumière, ce qui donne une épreuve encrée qui est inverse du modèle. Cette encre forme en même temps réserve, et on peut faire mordre la plaque de laiton par un acide. On peut, d'après MM. Garnier et Salmon, transformer cette plaque en planche lithographique en faisant suivre cette morsure d'un dépôt électro-chimique de fer : ce dépôt s'opère là où était l'amalgame; on enlève l'encre grasse formant réserve, le laiton est mis à nu, ioduré, puis amalgamé, et en passant le rouleau d'encre grasse, celle-ci ne s'attachant pas aux parties amalgamées, on peut obtenir des épreuves; mais ce procédé, curieux quant aux réactions observées, n'a pu donner de résultats satisfaisants que pour la reproduction des dessins au trait.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 36, p. 780, 1853. — *Bulletin de la Société française de photogr.*, t. 4, p. 317, et t. 13, p. 93.

(2) *Bulletin de la Société française de photogr.*, t. 1, p. 80, et t. 13, p. 97.

On doit citer encore l'emploi de l'huile de lin lithargée comme donnant, d'après M. l'abbé Laborde (1), une substance photographiquement impressionnable qui, de même que le bitume de Judée, pourrait servir à former des planches gravées.

Gravure par moulage. Helioplastie. — Il y a des procédés de gravure photographique qui sont fondés sur d'autres effets que ceux résultant de l'action directe des acides sur les plaques métalliques pour les creuser inégalement et pour donner les différents tons de l'image à reproduire. On a vu dans le livre précédent, page 174, qu'en 1840 M. Ponton avait employé le bichromate de potasse pour préparer un papier sensible sur lequel les ombres des images étaient représentées par de l'oxyde hydraté de chrome. Peu de temps après (2), je fis usage de l'action exercée par la lumière sur l'acide chromique mélangé à l'amidon pour modifier cette dernière substance et lui enlever la propriété si connue de se colorer en bleu par l'iode. Ensuite, comme on vient de le voir, en 1853 M. Talbot utilisait l'action de l'acide chromique pour proposer le procédé de gravure dont il vient d'être question. En 1855 M. Poitevin (3) fit deux nouvelles applications de cette action de la lumière sur les mélanges de sels à base d'acide chromique et des matières gélatineuses ou gommeuses; l'une était relative au procédé de litho-photographie dont il sera question plus loin; l'autre concernait la production de gravures en relief ou en creux.

Ce procédé de gravure, nommé hélioplastie, repose sur la propriété qu'a la gélatine sèche et imprégnée d'un bichromate, de bichromate de potasse par exemple, étant soumise à l'action de la lumière de perdre la propriété de se gonfler dans l'eau, tandis que la gélatine ainsi préparée et non impressionnée s'y gonfle d'environ six fois son volume. On applique alors une couche plus ou moins épaisse de dissolution de gélatine sur une surface plane, de verre par exemple ; on la laisse sécher, et on la plonge ensuite dans une dissolution d'un bichromate dont la base n'ait pas d'action sur la gélatine ; on laisse sécher de nouveau la surface, et on impressionne la couche au travers d'un cliché photographique. Après l'impression, on plonge dans l'eau la couche de gélatine ; toutes les parties qui n'ont pas reçu l'impression

(1) *Bulletin de la Société française de photogr.*, t. 4, p. 213.

(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 10, p. 469, 1840.

(3) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 42, p. 20. — *Bulletin de la Société franc. de photographie*, t. 3, p. 65.

de la lumière se gonflent et forment des reliefs, tandis que celles qui ont été impressionnées, ne prenant pas d'eau, restent en creux. On transforme ensuite cette surface de gélatine présentant des reliefs et des creux, en planches métalliques en la moulant avec du plâtre, puis en déposant sur ce moule du cuivre métallique, ou bien en précipitant directement du cuivre par la galvanoplastie sur la surface de la gélatine préalablement rendue conductrice de l'électricité. Par ce procédé, les dessins négatifs au trait ont fourni à M. Poitevin des planches métalliques en relief destinées à l'impression typographique, tandis que les dessins positifs ont donné des planches en creux pouvant servir à l'impression en taille-douce.

A peu près à la même époque, M. Pretsch (1) fit connaître une méthode qui au début était basée sur la réaction suivante : lorsqu'une couche de gélatine mélangée d'un bichromate soluble a reçu partiellement l'influence de la lumière, la partie non influencée se dissout dans l'eau tiède et disparaît, tandis que la partie influencée, devenue insoluble, résiste à l'action de l'eau tiède, et en se desséchant sur son support (lame de verre ou de métal), se solidifie et donne un relief; ce relief peut alors être moulé et transformé ainsi en contre-épreuve métallique. Plus tard, M. Presch s'est également servi du gonflement de la gélatine non altérée.

M. Placet (2) a fait usage des procédés précédents, et surtout du second, en lavant les épreuves non pas du côté où la lumière les a frappées, mais du côté opposé, et, ainsi que M. Fargier l'avait fait pour les épreuves au charbon (voir page 195), il a pu obtenir de cette manière des planches galvanoplastiques en relief et en creux qui présentent beaucoup de finesse.

M. Dulos a appliqué à la gravure photographique le procédé ingénieux qu'il a imaginé pour obtenir des planches gravées en relief ou en creux, et dont il fait usage depuis plusieurs années (3). Ce procédé consiste essentiellement à ne pas creuser les planches de cuivre ou d'acier à l'aide des acides ou par le burin, mais à obtenir des planches gravées par moulage galvanoplastique comme dans les diverses méthodes dont il vient d'être question. Le dessin à graver est fait, sur une lame de cuivre argentée, au moyen d'un crayon analogue au crayon

(1) *Bulletin de la Société française de photogr.*, t. 2, p. 190; t. 4, p. 114; t. 15, p. 93 et suiv.

(2) *Id.*, t. 9, p. 328; t. 10, p. 68; t. 13, p. 105.

(3) *Rapport du jury international de l'exposition universelle de Londres de* 1862, t. 5, p. 400. — *Comptes rendus de l'Académ. des sciences*, t. 36, p. 127. — *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, t. 10, p. 184, et t. 11, p. 209.

lithographique ; en versant sur la surface de cette lame un amalgame ou un alliage fusible qui mouille les parties argentées et ne s'attache pas aux traits du dessin, on forme, après la solidification de l'amalgame ou de l'alliage, des reliefs et des creux dont la reproduction inverse est obtenue par un dépôt galvanique de cuivre ; les parties saillantes de ce dépôt correspondant aux traits du dessin, on a donc ainsi une planche typographique. On peut, par un procédé analogue, obtenir une planche gravée en creux à la manière des planches en taille-douce : après avoir fait le dessin sur la lame de cuivre argentée comme ci-dessus, on dépose électro-chimiquement du fer sur cette lame, le dépôt n'ayant lieu que là ou l'argent reste à nu ; on enlève le dessin au crayon à l'aide d'une huile essentielle, et l'amalgame ou l'alliage adhère aux parties argentées correspondantes aux traits du dessin, et laisse intactes les parties recouvertes de fer. On a alors par moulage galvanoplastique une planche en cuivre dont les creux correspondent aux traits du dessin. Ce procédé donne des gravures dont les demi-teintes et les traits ont une grande finesse.

M. Dulos a pensé que le dessin photographique pouvait remplacer le dessin au crayon, et en faisant usage des composés impressionnables d'argent ou de cuivre dont on a parlé antérieurement il a obtenu, à l'aide de clichés négatifs, des épreuves sur plaques d'argent ou de cuivre permettant aux amalgames ou aux alliages de donner des reliefs et des creux qui sont ensuite moulés par dépôt électro-chimique de cuivre. En déposant électro-chimiquement du fer sur la surface de ces plaques comme on le fait généralement aujourd'hui pour les gravures sur cuivre, ces plaques gravées ont pu tirer un très-grand nombre d'exemplaires sans s'altérer. On voit que cette méthode de gravure diffère des précédentes en ce que la gravure est obtenue non pas en attaquant la planche métallique, mais en se servant du dessin photographique comme d'un support pour produire, par action capillaire, une planche gravée en relief ou en creux.

§ 2. *Litho-photographie.*

Quelques essais de litho-photographie avaient été faits en 1852 (1) au moyen du bitume de Judée, dont une solution dans l'éther était appliquée sur une pierre lithographique ; après l'impression sous le cliché,

(1) Barreswil et Davanne, *Chimie photographique.*

la pierre était lavée dans l'éther, puis acidulée et gommée et recevait ensuite le rouleau d'encre grasse; les parties du bitume rendues insolubles par l'action de la lumière avaient formé réserves, et recevaient l'encre d'imprimerie. Mais la nécessité de faire usage de bains d'éther et les mêmes difficultés qui s'étaient présentées lors de l'emploi du bitume pour la gravure photographique se retrouvaient encore pour l'application de ce procédé.

On a vu précédemment, page 203, que M. Poitevin avait reconnu que l'encre grasse avait la possibilité d'adhérer aux parties insolées d'un mélange d'une matière gommeuse ou gélatineuse et d'acide chromique; dès lors il eut l'idée d'appliquer ces réactions aux pierres lithographiques et d'obtenir une impression des dessins photographiques analogue aux impressions ordinaires. En 1855 il réussit complétement à atteindre ce but (1). Voici en résumé comment il opère :

Le mélange qui réussit le mieux est un mélange à volumes égaux d'albumine, ou blanc d'œuf battu, et d'une dissolution saturée de bichromate de potasse. On applique avec un pinceau à vernir ce mélange sur la surface de la pierre lithographique préalablement lavée et séchée, puis, à l'aide d'un tampon de linge on enlève l'excès de la préparation. On soumet ensuite la surface de cette pierre à l'influence de la lumière sous un cliché négatif redressé du dessin à reproduire; cette exposition dure 15 ou 20 minutes, ou plus si la lumière active est faible. Cela fait, on rentre la pierre au laboratoire, on mouille sa surface avec une éponge, et l'on passe à plusieurs reprises le rouleau d'encre grasse; la surface de la pierre ne retient l'encre grasse que sur les parties modifiées par la lumière et devenues insolubles, les autres parties renfermant la matière gommeuse ou gélatineuse et restées solubles sont enlevées. Cette pierre est traitée par de l'acide faible, puis gommée et séchée comme une pierre lithographique ordinaire; on obtient donc ainsi des épreuves positives à l'encre d'impression, qui, soumises au tirage mécanique bien connu de la lithographie, fournissent autant d'épreuves qu'une pierre ordinaire.

Cette méthode est maintenant exploitée dans les ateliers de M. Lemercier; elle a l'avantage d'être très-simple et très-exacte dans ses résultats, aussi est-elle tout à fait industrielle. Un grand nombre de personnes l'ont mise en usage ou bien l'ont prise pour bases de procédés

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 42, p. 20. — Poitevin, *Impression photogr. sans sels d'argent*, p. 76. — *Bulletin de la Soc. franç. de phot.*, t. 3, p. 42.

de tirage soit sur pierre, soit sur zinc ou sur un autre métal (1). Bien que des résultats très-remarquables de gravure par les différentes méthodes indiquées précédemment aient été présentés au concours pour le prix fondé par M. le duc de Luynes pour l'impression à l'encre grasse des épreuves photographiques, cependant la commission, d'un avis unanime, l'a décerné à M. Poitevin pour l'invention de son procédé de photo-lithographie, procédé qui permet d'obtenir sans retouches une épreuve photographique quelconque à un très-grand nombre d'exemplaires, comme avec une pierre lithographique ordinaire.

CHAPITRE IV.

Reproduction des couleurs par l'action de la lumière.

§ 1. *Préparation de la couche sensible. Sous-chlorure d'argent.*

Plusieurs observateurs avaient remarqué que le chlorure d'argent prenait différentes nuances suivant les circonstances de sa préparation, ou suivant la couleur de la lumière qui le frappe : Ainsi il paraît que Seebeck avait reconnu qu'il affectait une teinte rouge sous l'influence des rayons rouges; M. J. Herschell (2) avait observé que le papier sensitif de chlorure d'argent exposé à l'action d'un spectre fortement concentré recevait une impression telle, que le rouge était vif, mais d'une couleur se rapprochant du rouge brique, le jaune manquait, le vert était sombre et passait au noir; M. Hunt (3) avait aussi obtenu des teintes rougeâtres sur des papiers préparés à l'aide du chlorure d'argent.

On sait, d'un autre côté, que le chlorure d'argent ordinaire, coloré en violet à la lumière, prend, quand on le chauffe, un teinte rougeâtre tout à fait semblable à celle que l'on observe dans la partie rouge du spectre. On peut se demander si ce dernier effet n'est pas dû à l'action de la

(1) Voir l'énoncé de ces différentes méthodes, *Bulletin de la Société française de photogr.*, t. 13, page 85, rapport pour le concours du prix fondé par M. le duc de Luynes.
(2) *Athenæum*, 1839, n° 621. — *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 23, p. 185.
(3) *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 26, p. 407.

chaleur; en tous cas, comme le chlorure d'argent ordinaire, quand il commence à se colorer, est légèrement violacé, que l'impression se manifeste d'abord dans la partie la plus réfrangible du spectre, et que, d'un autre côté, il prend une teinte rouge briquetée dans la partie la moins réfrangible, c'était une coïncidence assez curieuse que de voir les deux extrémités des impressions photogéniques du spectre sur le chlorure d'argent tourner l'une au violet dans le violet, l'autre au rouge dans le rouge prismatique.

J'ai commencé en 1838 et 1839 à m'occuper de ce sujet; j'avais pensé d'abord que l'effet de coloration produit dans la partie visible du spectre était dû à une action calorifique; mais depuis j'ai reconnu qu'il n'en était pas ainsi. Il faut examiner d'abord dans quelles conditions on doit se placer pour obtenir très-nettement ces effets. Si le chlorure d'argent n'est pas obtenu par double précipitation à la surface du papier, mais bien dans un verre à réactifs, et déposé sur un corps tel que du verre, de la porcelaine, du carton, etc., si ce chlorure n'a pas été exposé préalablement à la lumière, aussitôt que l'on projette le spectre solaire sur sa surface, il ne commence à s'impressionner que dans la partie ultra-violette, et on n'obtient qu'une teinte légèrement violacée, qui se fonce de plus en plus; d'un autre côté, il n'y a rien de produit dans la partie visible de l'image prismatique. Mais si on se sert de chlorure parfaitement pur et sans excès d'azotate d'argent, et que ce chlorure ait été primitivement impressionné, l'effet est très-appréciable : dans le violet, la teinte se fonce de plus en plus et est semblable à celle qui se serait produite à la lumière diffuse; mais dans la partie rouge on obtient une légère teinte rosée, et il n'y a aucun effet bien manifeste dans la partie jaune et verte, où l'on observe néanmoins une faible décoloration.

Si le chlorure est obtenu à la surface d'un papier plongé successivement dans l'eau salée, puis dans un bain d'azotate d'argent, et qu'il y ait un excès d'azotate d'argent, l'effet n'est pas le même : dans ce cas, ou bien la feuille de papier n'a pas été exposée préalablement à la lumière, et on n'a d'action chimique manifeste que dans la partie ultra-violette; ou bien le papier a été exposé au rayonnement, et il devient sensible même dans la partie visible du spectre depuis le bleu jusqu'au rouge; il y a alors une action de continuation qui a été étudiée dans le livre précédent, page 84, et les effets de coloration sont faibles, si toutefois ils sont observables.

J'ai pensé dès lors à préparer le chlorure d'argent directement en attaquant une lame d'argent par du chlore, soit gazeux, soit provenant

de la décomposition des chlorures (1). En exposant d'abord une lame d'argent à l'action du chlore gazeux, la lame est devenue blanche-grisâtre, et en projetant le spectre solaire sur sa surface, on n'a observé aucun phénomène bien net; seulement, une teinte grise s'est manifestée dans le violet et a signalé une réaction chimique. J'ai fait attaquer alors la lame d'argent par le chlore émanant de l'eau chlorée, ou, mieux encore, en la plongeant dans l'eau chlorée elle-même. La lame étant restée plongée dans le liquide pendant quelques instants, s'est recouverte d'une couche ayant une teinte grise-blanchâtre, et les actions de la lumière ont été bien différentes : après avoir projeté le spectre lumineux sur sa surface pendant quelques minutes, en retirant la lame et en l'examinant au jour, j'ai aperçu comme un *souvenir du spectre* fixé sur la lame et dont les nuances correspondaient exactement aux parties lumineuses de même couleur du spectre solaire; la place où le rouge avait frappé était rouge pâle, le jaune était jaune, le bleu, bleu, etc. En plaçant de nouveau la lame dans la même position et en laissant continuer pendant longtemps l'action du spectre, les effets ont disparu, et il est resté à la fin une teinte grise qui s'étendait sur toute la partie frappée par le spectre.

J'ai vu alors que ce n'était pas une simple coïncidence de teinte qui avait donné au chlorure d'argent préalablement impressionné la couleur rouge d'un côté du spectre et violette de l'autre, mais que dans ce cas le chlorure blanc non altéré était mélangé probablement de sous-chlorure, c'est-à-dire d'un chlorure ayant un équivalent de chlore de moins que le chlorure blanc, et que cette dernière substance donnait lieu aux teintes observées.

Alors à l'eau chlorée j'ai substitué des dissolutions de chlorures (bi-chlorure de cuivre, de fer, etc.), d'hypochlorites (hypochlorites de soude, de chaux, etc.), capables de céder du chlore à une lame d'argent, et j'ai obtenu, comme avec la première dissolution, des surfaces capables de reproduire l'image du spectre avec ses couleurs de manière à correspondre aux parties de même nuance du spectre réel. Une de celles qui ont donné les meilleurs résultats, et dont j'ai fait connaître la composition en 1848, est une dissolution contenant du bichlorure de cuivre. La préparation suivante est très-facile à obtenir : on prend du sulfate de cuivre du commerce et du chlorure de sodium; on met

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 22, p. 451 (1848). — *Id.*, t. 25, p. 447 (1849). — *Id.*, t. 42, p. 81.

ces deux sels en excès dans un verre à réactifs avec une certaine quantité d'eau ; la dissolution s'opère avec production d'une double réaction, et il se forme du bichlorure de cuivre ; on mélange un volume de ce liquide avec un volume d'une dissolution saturée de sel marin et six volumes d'eau : il suffit alors de plonger une plaque d'argent ou de plaqué d'argent dans ce liquide pour qu'elle prenne rapidement une teinte violette, due à la présence d'une légère couche de chlorure d'argent, et qu'elle devienne impressionnable à l'action du spectre, dont elle reproduit les nuances principales. Un autre chlorure, tel que le chlorure de potassium, de strontium, etc., substitué au chlorure de sodium donne les mêmes résultats, et la base du sel alcalin n'a aucune action sur le composé d'argent formé.

Les lames d'argent employées doivent être d'une très-grande pureté, et même préalablement chauffées jusqu'à 300 ou 400° si elles ont déjà servi à des expériences avec les vapeurs mercurielles, puis décapées avec soin, car ce procédé met en évidence les moindres traces de matières étrangères qui se trouveraient à leur surface.

Ce mode de préparation, quoique simple, ne permet pas d'augmenter à volonté l'épaisseur de la couche impressionnable; aussi l'ai-je complétement abandonné pour y substituer un mode de préparation qui permet à la couche obtenue de donner des résultats bien autrement remarquables, et d'avoir telle épaisseur que l'on veut. Ce procédé consiste, comme on va le voir plus loin, à amener peu à peu à la surface des lames de plaqué, par l'action de l'électricité, du chlore à l'état naissant, qui attaque l'argent et donne la couche impressionnable.

On doit encore remarquer que bien qu'à l'aide de ces différentes méthodes de préparation on ne forme que des combinaisons de chlore et d'argent, cependant les surfaces impressionnables sont loin de présenter les mêmes effets sous l'influence de la lumière blanche. Presque toutes se colorent en gris ou en violet foncé à la lumière blanche, à l'exception de celle que l'on obtient immédiatement par l'action des bichlorures, et qui donne une impression blanche, ou du moins plus claire que le fond de la plaque ; en outre, le chlorure d'argent obtenu par ce dernier procédé est plus rapidement impressionné que s'il s'était préparé autrement, mais, comme on le verra, il ne donne pas toutes les couleurs du spectre lumineux.

Ces résultats montrent que la composition chimique de la substance sensible pouvant être la même dans ces diverses conditions, l'arrange-

ment moléculaire doit être différent, puisque j'ai reconnu que les effets ne sont pas indentiques. On verra plus loin qu'à l'aide de la chaleur ou de la lumière les plaques métalliques préparées de diverses manières peuvent être amenées dans des conditions analogues.

J'ai reconnu que quelle que soit la méthode employée il faut préparer rapidement la couche sensible, car en opérant lentement lors de l'action du spectre solaire sur la plaque, on voit une impression se produire au delà du violet, ce qui ne doit pas avoir lieu quand la surface est bien préparée. Cette circonstance vient à l'appui de cette opinion, que la couche formée est du sous-chlorure d'argent; car si le chlore a le temps d'agir de nouveau sur le sous-chlorure pour le transformer en chlorure ordinaire, il devient alors sensible aux rayons extrêmes du spectre comme le chlorure blanc obtenu par précipitation. Du reste, quand on plonge les lames dans une solution aqueuse d'ammoniaque et qu'on détruit la couche sensible, on trouve, même avant toute impression préalable de la lumière, que les lames cèdent du chlorure d'argent à l'ammoniaque, mais qu'il reste une poussière blanche à leur surface; il se produit donc une réaction analogue à celle qui se manifeste quand on traite par l'ammoniaque du chlorure blanc altéré par la lumière.

Pour préparer la couche impressionnable à l'aide des courants électriques, on commence par décaper et même par chauffer la lame de plaqué d'argent, ou la lame d'argent que l'on emploie, et on lui donne un poli parfait comme si l'on voulait obtenir une épreuve daguerrienne; puis, fig. 59, on suspend cette lame MN, à l'aide de deux petits crochets en fil de cuivre, de façon à ce qu'elle puisse être plongée au milieu d'une masse liquide, et être enlevée à volonté au moyen du fil R qui est formé par la réunion des deux fils de cuivre. Le liquide dans lequel on

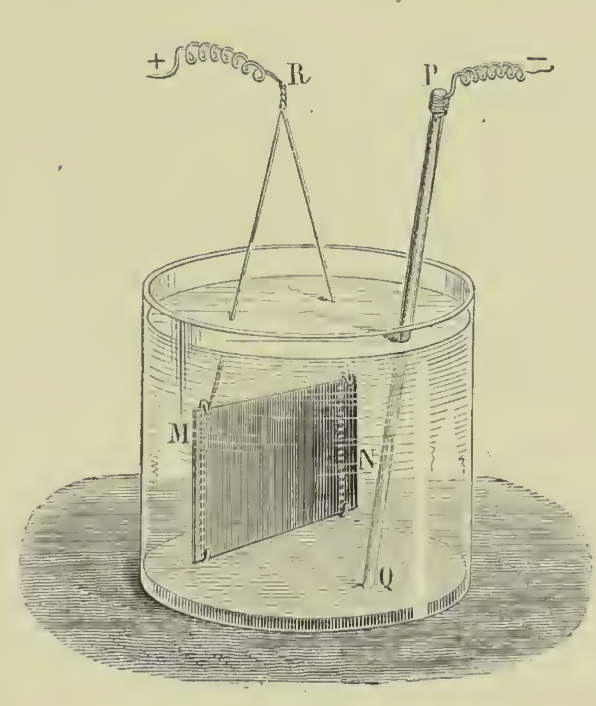


Fig. 59.

plonge la lame est de l'eau acidulée par de l'acide chlorhydrique, dans les proportions de 8 litres d'eau pour 1 litre d'acide ordinaire. On attache alors les fils de cuivre qui forment les supports en crochets de la lame, au pôle positif de la pile qui doit agir, et l'on plonge la lame au milieu de la dissolution au moment même d'opérer. La pile est formée d'un ou de plusieurs couples à acide azotique, suivant l'étendue de la lame et la disposition de l'appareil. Sans l'addition dont il va être question plus loin, si l'on opère avec des quarts de plaque daguerrienne (10^{c},6 sur 8 centimètres), il faut un couple à acide azotique fortement chargé. Avec des demi-plaques, deux couples sont nécessaires, et même trois pour des plaques entières.

Lorsque la lame est dans le liquide, et se trouve maintenue verticalement, on plonge dans ce même bain un fil de cuivre ou de platine PQ en communication avec le pôle négatif des couples, afin de fermer le circuit voltaïque. On promène ce fil dans le liquide parallèlement à la surface argentée de la lame, et à 8 ou 10 centimètres de distance. Alors on voit des bulles d'hydrogène se détacher de ce fil, tandis que la surface d'argent se colore par suite du transport du chlore provenant de la décomposition de l'acide chlorhydrique. Si l'on promène le fil en face de la lame, la coloration de toute la surface est la même, et celle-ci change également de nuance dans tous les points; mais si l'on n'avait pas cette précaution, la surface sensible n'aurait pas partout la même épaisseur.

Les nuances qui se produisent sur la lame sont celles des lames minces ou des anneaux colorés vus par transmission, et sont analogues à celles des dépôts des oxydes métalliques à la surface des métaux. La surface de la lame commence à se colorer en gris, puis prend des teintes jaunâtres, violettes et vertes, qui se succèdent à mesure que le dépôt augmente d'épaisseur. Quand on veut se baser seulement sur la teinte du dépôt pour juger de son épaisseur, il faut opérer dans une pièce peu éclairée, retirer la lame d'argent du bain à différentes reprises, et s'arrêter à la teinte convenable, qui est en général du troisième, du quatrième ou du cinquième ordre, suivant les expériences que l'on a en vue, et ainsi qu'on le dira plus loin. Quand on a atteint le degré voulu, on lave la plaque à l'eau distillée, puis on la fait sécher en l'inclinant légèrement, et en la chauffant à l'aide d'une lampe à alcool, tout en insufflant de l'air à sa surface pour accélérer l'évaporation. On juge exactement de l'ordre de l'épaisseur de la couche impressionnable

en regardant la surface près du bord vers les points où les crochets en cuivre étaient attachés; on observe une suite d'anneaux colorés qui entourent ces points, se succèdent avec régularité, et viennent se fondre avec la nuance générale de la surface.

Si l'on examine la plaque à l'aide de la lumière d'une lampe, elle paraît recouverte d'une légère poussière blanchâtre, formant comme un faible voile. Pour l'enlever, on place cette plaque sur le cadre à polir, et on passe à différentes reprises à sa surface un polissoir en velours. Elle devient brillante, acquiert une teinte bois assez foncée, et est alors éminemment propre à recevoir les impressions colorées des différentes parties du rayonnement lumineux. Ce léger poli après le dépôt de la couche sensible est nécessaire pour donner de la vivacité aux nuances que l'on veut obtenir.

On peut rendre ce procédé d'une application facile et certaine en déterminant, dans chaque circonstance et à chaque instant, la quantité de chlore que l'on met à la surface de la lame d'argent. Pour cela, on interpose dans le circuit composé de la pile et du bain d'eau acidulée par l'acide chlorhydrique dans lequel plonge la lame attachée au pôle positif, un voltamètre à eau; de cette manière, le courant qui décompose l'acide chlorhydrique et transporte le chlore sur l'argent décompose aussi l'eau acidulée du voltamètre. Les décompositions électro-chimiques ayant lieu en proportions définies, il se porte autant de chlore en volume sur la surface de la lame d'argent qu'il se dégage de gaz hydrogène dans l'éprouvette placée au-dessus de l'électrode négative du voltamètre; si donc on recueille ce gaz, on voit à chaque instant à quel point en est la préparation. Pour opérer ainsi, il faut garantir avec un vernis le verso de la lame de plaqué, afin que le cuivre soit préservé et que l'argent métallique soit seul attaqué par le chlore provenant de la décomposition de l'acide chlorhydrique.

On a pu par ce moyen préparer les lames dans l'obscurité, et avoir des couches uniformes et d'une épaisseur déterminée. D'après cette addition d'un voltamètre, l'on peut dire que cette méthode de préparation est la seule qui puisse donner, dans des expériences de ce genre, des couches impressionnables identiques à elles-mêmes. Mais il est nécessaire, quand on opère ainsi, d'employer un plus grand nombre de couples que lorsqu'on ne se sert pas de voltamètre, et cela pour vaincre la résistance introduite dans le circuit. Ainsi, pour des lames dites quarts de plaque, il faut au moins trois couples à acide azotique fortement

chargés ; pour des demi-plaques et des plaques entières, quatre, cinq et même six couples. Pour les expériences courantes il est inutile, dans la mesure du gaz dégagé dans le voltamètre, de faire la correction de la pression, et de la tension de la vapeur d'eau ; il suffit de maintenir la température à 10 ou 12 degrés, et de disposer l'éprouvette graduée de façon à ce que le gaz hydrogène soit pris à la pression ordinaire, au moment où l'on observe son volume.

Il résulte des déterminations faites à l'aide de préparations opérées sur des surfaces d'argent de $10^c,6$ sur 8 centimètres qu'en rapportant tout à l'unité de surface, et en évaluant le chlore d'après le volume de l'hydrogène du voltamètre déterminé en centimètres cubes, il faut par décimètre carré :

$2^{cc},80$ { de chlore pour que la teinte violette de la couche du deuxième ordre commence à paraître.

De $3^{cc},80$ à $3^{cc},90$ { pour la teinte violette du troisième ordre, donnant déjà de bonnes impressions colorées.

De $6^{cc},50$ à $6^{cc},90$ { pour que la couche du quatrième ordre ait une épaisseur suffisante pour donner de belles reproductions des spectres lumineux.

Si l'on avait la densité exacte de ce chlorure, rien ne serait plus facile que de déduire des résultats précédents l'épaisseur de la couche impressionnable. Or, comme on ne connaît pas sa composition chimique, on ne peut faire que des suppositions à ce sujet. En admettant, par exemple, que la densité de ce chlorure soit la même que celle du chlorure blanc fondu, et que cette densité soit 5,277, on trouve que chaque centimètre cube de chlore donnerait sur 1 décimètre carré de surface d'argent une couche de chlorure d'une épaisseur de $\frac{1}{4120}$ de millimètre ; cela ferait pour l'épaisseur correspondant à 4 centimètres cubes, $\frac{1}{1030}$ de millimètre, et pour 7 centimètres cubes $\frac{1}{588}$ de millimètre. Mais, vu l'incertitude où l'on est sur la composition du corps impressionnable, on doit s'en tenir à la détermination de la quantité de matière d'après la proportion de chlore transportée sur la surface de la lame d'argent.

Je ferai remarquer que ce procédé se prêterait bien à la détermination de l'épaisseur des lames minces produites au moyen des actions électriques à la surface des plaques métalliques par l'oxyde de plomb, de manganèse, etc., suivant la méthode expérimentale découverte par mon père (1).

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 17, p. 1 et 53 ; t. 18, p. 197. — Becquerel, *Traité d'électro-chimie*, 2me édit. (1864), p. 490.

En laissant le courant électrique agir plus longtemps qu'il vient d'être dit, la lame devient noire par suite d'une plus grande épaisseur de chlorure d'argent, mais ne donnerait pas d'aussi bons résultats sous l'action de la lumière. Il faut opérer entre les limites de 4 à 7 centimètres cubes de chlore par décimètre carré, suivant l'épaisseur de la couche dont on a besoin. Plus la couche est mince, plus la substance est impressionnable, mais aussi moins les nuances colorées sont belles. Les plaques préparées ainsi peuvent se conserver à l'abri de la lumière aussi longtemps que cela est nécessaire, et reçoivent toujours également bien les impressions lumineuses colorées.

On a vu plus haut que si l'on plongeait une lame d'argent dans une dissolution contenant des chlorures et capable de céder du chlore à l'argent, on avait une couche de sous-chlorure pouvant donner des impressions colorées; si l'on plonge dans ces liquides des papiers argentés, des lames de verre recouvertes de collodion dans lequel se trouve incorporé de l'argent réduit (préparées en exposant à la lumière le collodion contenant de l'azotate d'argent et en le traitant par un sel réducteur), on obtient également des surfaces qui jouissent de la même faculté; mais les effets sont moins beaux et bien moins complets que ceux que l'on peut obtenir avec des lames métalliques.

M. Poitevin (1), en partant de ces résultats, a cherché à obtenir également sur papier des images colorées. Il a mis le sous-chlorure d'argent violet en présence d'un sel oxygéné, et il lui a paru qu'il obtenait des résultats meilleurs que sans cette addition. Voici le procédé employé : du papier photographique étant préalablement recouvert d'une couche de sous-chlorure d'argent violet, obtenu par la réduction à la lumière du chlorure blanc en présence d'un sel réducteur (en général le protochlorure d'étain) et bien lavé, on applique sur sa surface un liquide formé par un mélange de 1 volume d'une dissolution de bichromate de potasse, de 1 volume d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre et de 1 volume d'une dissolution à 5 p. 100 de chlorure de potassium. On laisse sécher ce papier, et on le conserve à l'obscurité.

A l'aide de ce papier, on peut obtenir des épreuves du spectre lumineux avec ses nuances, mais moins belles que sur plaques; les teintes bleues et violettes surtout sont moins vives, mais les blancs dans les reproductions de tableaux colorés ou de peinture sur verre sont bien tran-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 61, p. 1111 (1865).

chés. Ce papier n'est pas plus rapidement impressionnable ni plus stable à la lumière que les plaques préparées comme il a été dit plus haut; aussi je préfère leur emploi dans tous les cas : il facilite seulement l'obtention des images colorées, car la préparation est simple.

Le sous-chlorure d'argent violet est le seul corps chimiquement impressionnable qui, véritable rétine minérale, jouisse jusqu'ici de la propriété remarquable de reproduire les nuances des rayons lumineux actifs et de peindre avec la lumière. Les iodures, bromures, etc., d'argent ne donnent aucune couleur, et même il suffit que le chlorure soit mélangé d'un peu de ces composés pour que toute nuance disparaisse.

§ 2. *Modification produite par la chaleur et par les rayons infra-rouges sur la couche sensible.*

Une observation que j'ai faite dès le début de mes recherches a montré que l'on pouvait faire subir à la plaque recouverte de chlorure une préparation qui la place dans toutes autres conditions et montre combien sont grandes les modifications que l'on peut apporter à cette substance impressionnable si extraordinaire. Cette préparation consiste à recuire la lame, c'est-à-dire à élever sa température dans l'obscurité ou mieux dans une salle faiblement éclairée, afin de pouvoir juger de la transformation de la substance par ses changements de couleur. On place pour cela la lame préparée sur un petit trépied de 2 décimètres de hauteur, de façon à ce que la partie chlorurée soit au-dessus ; en promenant alors au-dessous de la lame la flamme d'une lampe à alcool, on échauffe cette lame graduellement et uniformément. On ne tarde pas à s'apercevoir, lorsque la température est voisine de 100°, que la couche sensible prend une teinte rosâtre; si l'on continue à chauffer, la couche devient rose, et quand on approche de la température rouge le chlorure fond et la surface impressionnable est détruite; il faut se garder d'atteindre ce point.

La lumière n'agit pas de la même manière sur cette plaque chauffée qu'avant de lui faire subir ce recuit. La lumière diffuse ou la lumière solaire directe agit en blanc sur la substance; en outre, les teintes des images colorées sont claires au lieu d'être sombres comme auparavant. Mais si d'un côté le recuit est avantageux, d'un autre il présente des inconvénients : avant l'élévation de température, les teintes jaunes, vertes, bleues, viennent bien sur les lames; après le

recuit, s'il a été trop élevé, les teintes jaunes et vertes sont beaucoup plus affaiblies et tournent au blanc ; il y a là un écueil à éviter : on a pu y remedier en opérant à une température beaucoup plus basse et prolongeant le temps du recuit.

Pour atteindre ce but on a employé une étuve à eau, chauffée à l'aide d'une lampe ou d'un bec de gaz, de telle sorte que l'on pût maintenir la température sensiblement constante pendant très-longtemps. On a vu alors qu'en maintenant la température de 30 à 35 degrés, et qu'en laissant les lames préparées exposées ainsi pendant plusieurs jours à l'action de la chaleur, la surface de ces lames change lentement de nuance, et l'effet a lieu comme à l'aide d'un recuit à plus haute température, mais avec de bien meilleurs résultats. En variant la durée de l'exposition des lames dans l'étuve, de trois ou quatre jours à six semaines, on a reconnu qu'après huit ou dix jours elles étaient dans un état convenable pour certaines expériences, surtout pour les reproductions des images colorées de la chambre noire.

Mais quelle est la nature de l'effet produit par une différence de température aussi faible soutenue pendant plusieurs jours sur le chlorure d'argent qui recouvre les lames? Il se manifeste probablement, dans cette circonstance, une modification dans l'état physique de la substance impressionnable, de façon que la lumière agit différemment sur elle; ce serait alors une action du genre de celle qui se produit lors de la formation du phosphore rouge. Du reste, je dois dire que j'ai placé dans l'étuve des lames daguerriennes iodurées ordinaires, et qu'au bout de vingt-quatre heures, au lieu d'une couche d'iodure d'argent jaune d'or à la surface de la lame de plaqué, il s'est trouvé une couche blanchâtre indiquant une modification profonde de la matière sensible. Je n'ai pas cherché à constater les qualités de cette matière comme substance photogénique, puisqu'elle ne produit pas d'impressions colorées; mais je rapporte l'expérience pour montrer que l'iodure d'argent, comme le chlorure, éprouve une altération par suite d'une élévation de température très-faible, mais soutenue.

L'action de certaines parties du rayonnement solaire peut produire les mêmes effets que l'action de la chaleur. Quand on examine l'effet produit par les rayons rouges extrêmes du spectre sur les surfaces impressionnables, et, ainsi qu'on le verra plus loin, quand les lames ne sont pas recuites, elles prennent dans cette partie de l'image prismatique entre les raies noires B et A et au delà de A une couleur violette qui

fonce rapidement et tourne au noir. On peut facilement avoir un écran mixte formé par la réunion d'un verre rouge foncé (coloré par le protoxyde de cuivre) et d'un verre bleu foncé (coloré avec le cobalt), qui ne laisse passer que ces rayons extrêmes et qui donne aux lames la même teinte foncée. Lorsqu'on vient à placer sous un tel écran une plaque préparée à la pile, mais non recuite, et qu'on l'expose aux rayons solaires pendant une heure ou deux, suivant l'intensité lumineuse, ou bien à la lumière diffuse pendant un jour ou deux, on la retire colorée en violet foncé, ou même presque noire; en se servant alors de cette lame pour recevoir l'image du spectre ou de la chambre noire, on trouve ce résultat remarquable qu'elle donne des teintes claires sur un fond noir, et que la lumière blanche agit en blanc, non pas avec autant d'intensité qu'en recuisant les lames, mais néanmoins avec assez de netteté.

Ainsi l'action des rayons rouges extrêmes donne à la couche impressionnable de sous-chlorure violet les mêmes propriétés que la chaleur, mais avec cet avantage que le fond reste sombre, au lieu de passer au rose; en outre, les teintes jaunes et vertes viennent très-bien sur cette surface, ce qui n'a pas lieu par le simple recuit. On peut également faire subir d'abord cette dernière préparation à une plaque préparée, puis ensuite élever sa température, c'est-à-dire employer successivement ces deux actions physiques.

On va indiquer dans le paragraphe suivant quels sont les effets produits sur les surfaces préparées simplement à la pile, ainsi que sur les lames recuites, ou bien exposées à l'action des rayons rouges extrêmes sous un écran mixte semblable à celui dont il vient d'être question.

§ 3. *Effets produits par les rayons différemment réfrangibles; spectre solaire, écrans incolores et écrans colorés.*

Le seul moyen d'étudier d'une manière exacte l'action des rayons différemment réfrangibles consiste à examiner les effets produits sous l'influence des diverses parties du spectre lumineux.

L'épaisseur de la couche impressionnable a une grande influence sur les résultats obtenus : trop mince ou trop épaisse, les couleurs des différentes parties du spectre laissent beaucoup à désirer. Le seul inconvénient qu'il y ait à opérer avec des couches d'une certaine épaisseur, c'est que plus la couche est épaisse plus l'action est lente à se manifester. Pour obtenir de bons effets, il faut préparer le chlorure dans l'obscurité,

de façon à mettre de $0^{cc},50$ à $0^{cc},90$ de chlore par décimètre carré de surface, c'est-à-dire à avoir une lame mince du quatrième ou du cinquième ordre des anneaux colorés.

Les plaques qui ont servi aux expériences avaient presque toujours, comme on l'a dit plus haut, 106 millimètres de longueur sur 80 millimètres de largeur. Le spectre était produit par un faisceau lumineux réfléchi sur la glace métallique d'un héliostat, se réfractant au travers d'un prisme de sulfure de carbone blanc, ou de flint blanc, puis traversant une lentille achromatique de 30 centimètres de foyer; il avait donc environ 80 millimètres de longueur sur 12 à 15 millimètres de largeur. Si l'ouverture du volet de la chambre noire est une fente mince d'un demi-millimètre de largeur, le spectre présente les raies noires bien marquées, mais alors il faut plusieurs heures d'action pour obtenir une belle reproduction photographique colorée du spectre lumineux. Si l'on veut hâter l'apparition de l'image du spectre, on donne à l'ouverture du volet une plus grande largeur, et l'action est plus rapide.

Surfaces impressionnables non recuites. — La partie de la lame qui commence à s'impressionner dans le spectre solaire est celle qui correspond au vert, au jaune, à l'orangé et au rouge, c'est-à-dire aux parties les plus lumineuses du spectre. Les points frappés par les rayons lumineux prennent des teintes qui correspondent à celles du spectre. En laissant continuer l'action, le bleu et le violet ne tardent pas à paraître, en même temps que les autres parties de l'impression prismatique prennent plus d'éclat. Seulement, la portion rouge de l'image qui correspond à la région située entre B et A, près de A, fonce rapidement et devient violet foncé ou plutôt d'une nuance amarante foncée ; cette coloration se continue même au delà de A, là où la rétine n'est plus impressionnée par la lumière. On juge des différentes teintes en arrêtant de temps en temps par un écran les rayons lumineux, et en examinant avec une lampe ou à l'aide de la lumière diffuse l'impression obtenue.

Au bout de plusieurs heures, si le spectre est peu intense, on a une très-belle reproduction du spectre lumineux avec toutes ses nuances : l'orangé, le vert, le bleu, le violet ont des tons très-vifs ; le rouge seul entre B et A est assez sombre. Sans cette teinte amarante ou puce foncée dans cette dernière région, on aurait la reproduction du spectre lumineux avec ses nuances correspondantes aux rayons actifs ; mais on doit remarquer qu'au commencement de l'action, dans les points où la teinte amarante foncée apparaît ensuite, vers le rouge extrême et au delà, l'im-

pression est rouge et de même nuance que celle du rouge du spectre.

Pour bien juger des tons jaunes, orangés et verts, il faut dilater le spectre. On opère alors en réfractant la lumière au travers de deux prismes placés l'un après l'autre, et l'on peut ainsi étaler à volonté les différentes parties de l'image prismatique. On voit de cette manière que les teintes obtenues sur les lames préparées comme je l'ai dit sont semblables à celles du spectre lumineux. La comparaison des nuances est très-difficile à faire, cependant je puis citer l'expérience suivante comme étant assez facile à répéter : après avoir obtenu une bonne impression colorée du spectre, on isole chaque portion successivement, et l'on promène ces espaces différemment colorés dans le spectre lumineux; on voit alors que cette portion paraît plus brillante dans la partie du spectre qui l'a produite que dans toute autre : ce qui montre bien que les rayons de même réfrangibilité que ceux qui ont donné lieu à cet effet sont réfléchis en plus grande abondance que les autres.

Si on laissait la plaque exposée au spectre pendant un temps plus long que celui qui a été indiqué, une teinte grise commencerait à se montrer dans le jaune et le vert, puis gagnerait peu à peu les autres parties du spectre à mesure que l'action se continuerait, et l'on finirait par avoir une impression monochromatique provenant de la décomposition complète de la substance impressionnable dans toute l'étendue du spectre. C'est donc lors du passage d'un état à un autre de la matière impressionnable que chaque rayon imprime sa couleur à cette matière; et lorsque la transformation chimique que les rayons provoquent est entièrement terminée, les couleurs ont disparu.

On peut remarquer dans ces images photographiques colorées du spectre solaire que l'action se limite à l'extrême violet visible et ne s'étend pas beaucoup au delà de H. Dans mes premiers travaux, la méthode de préparation ne m'avait pas permis d'atteindre ce but, et il se manifestait une action dans cette région. Ce résultat paraît tenir à ce que la préparation électro-chimique du composé sensible ayant lieu rapidement, on évite la formation du chlorure blanc, qui est impressionné au delà du violet.

Si l'on opère à l'aide d'une petite ouverture du volet de la chambre noire, on sait que l'image du spectre donne bien nettement les raies, mais les impressions photographiques colorées, à l'exception des grosses raies H, G, F, A, ne les présentent pas. Cet effet tient peut-être à une espèce

d'irradiation qui fait que sur le chlorure impressionné par la lumière l'action ne se limite pas exactement aux points frappés et gagne un peu les parties voisines, à mesure que l'impression se produit et que l'on prolonge la durée de l'expérience.

Surfaces impressionnables recuites. — Le recuit des lames, comme il a été dit plus haut, a pour effet de donner des surfaces sensibles qui reçoivent des impressions des spectres lumineux présentant des teintes plus claires que le ton général formant le fond de la plaque ; mais en même temps les couleurs jaunes et vertes sont moins marquées, tandis que les couleurs rouges, bleues et violettes ont des nuances aussi belles. Si la lame a été peu chauffée, et que la surface ait seulement une teinte bois, c'est-à-dire un peu rougeâtre, alors le spectre s'imprime bien avec toutes ses couleurs; le jaune se marque ainsi que le vert ; le bleu et le violet deviennent superbes ; l'orangé se peint bien et le rouge aussi, mais toujours au delà de la raie A, à l'extrême rouge, la couleur amarante ou puce se produit, et cette portion de l'image finit même par acquérir une teinte presque noire. Quant à l'impression qui tend à se manifester au delà du violet, elle est en général plus faible. La lumière blanche donne seulement une teinte grise, et non pas un beau blanc comme si le recuit eût été fait à une température plus élevée.

Lorsqu'on opère avec des lames chauffées davantage, l'image du spectre devient plus claire ; mais aussi les diverses nuances colorées disparaissent de plus en plus. Si la couche sensible est rose, l'image prismatique ne présente plus de bien distinctes que les couleurs rouges, bleues et violettes : le vert et le jaune se marquent en blanc légèrement jaunâtre, mais la lumière blanche agit en donnant une belle teinte blanche, et la couleur puce ou amarante à l'extrême rouge n'est plus sensible.

Enfin, si la plaque a été chauffée jusqu'au commencement de fusion du chlorure d'argent, alors l'image se détache en blanc jaunâtre sur un fond rougeâtre plus sombre et n'est colorée qu'à ses extrémités, d'un côté en bleu tournant au violet, de l'autre au rouge. Les teintes intermédiaires ont disparu et sont remplacées par une nuance blanche légèrement jaunâtre.

Ainsi à mesure que la substance impressionnable est recuite à une température plus élevée, les teintes vertes, jaunes et orangées, c'est-à-dire les parties centrales de l'image prismatique s'impriment en blanc. Mais si l'on se borne à placer les lames pendant quelques jours

dans l'étuve chauffée de 27 à 30 degrés, on évite en partie cette extinction des couleurs vertes et jaunes lors de l'action du spectre, et d'un autre côté l'on diminue beaucoup la teinte foncée qui se produit entre B et A, et qui se prolonge au delà du rouge extrême A.

Surfaces impressionnables soumises à l'action des rayons rouges extrêmes. — D'après ce que l'on a vu dans le paragraphe précédent l'action exercée par les rayons les moins réfrangibles de la lumière est très-remarquable en ce qu'elle conduit à un résultat analogue à celui que l'on obtient en élevant la température des lames. Il semble donc que dans l'un et l'autre cas une modification physique du même ordre se manifeste ; et cela est d'autant plus curieux que la partie du spectre où ce phénomène se produit est précisément celle où se trouve le maximum de chaleur : mais dans ces expériences l'élévation de température des lames dans le rouge extrême n'est pas appréciable, et l'effet est produit par une action particulière de cette portion du rayonnement lumineux.

Le spectre solaire impressionne vivement la surface ainsi modifiée par une exposition préalable aux rayons solaires sous un écran mixte formé par des verres rouge et bleu, écran qui ne laisse passer que le rouge extrême du spectre. L'action commence, comme précédemment, dans l'orangé, le jaune et le vert ; elle s'étend peu à peu et plus lentement vers le bleu et le violet d'un côté, puis vers le rouge de l'autre. Toutes les teintes sont claires comme si les lames eussent été recuites, à l'exception du bleu extrême et du violet, si l'action des rayons rouges a été trop prolongée; mais l'impression prismatique est beaucoup plus belle, en ce sens que le vert, le jaune et l'orangé ont des nuances plus vives qu'avant l'action des rayons rouges extrêmes. Ainsi, à l'avantage que possède le chlorure modifié par les rayons les moins réfrangibles sur celui qui a subi le recuit, de donner un fond noir sur lequel viennent se peindre les différentes nuances prismatiques, se joint celui de conserver les teintes vertes et jaunes.

Du côté du rouge, l'image du spectre ne donne une teinte brillante que jusqu'en B; à partir de cette ligne, la teinte foncée qui se serait produite, étant celle qui domine sur toute la surface, aucun effet n'a lieu dans les premiers instants; cependant, si primitivement le chlorure n'a séjourné qu'un temps insuffisant sous l'écran mixte qui ne laisse passer que le rouge extrême, le spectre solaire donne encore une impression foncée au delà de B et de A. Si l'action de l'écran a été

suffisamment prolongée, alors l'action du spectre se limite vers B, peut-être un peu au delà, et s'étend à peine jusqu'à A ; dans ce cas, l'impression colorée que reçoit le chlorure est d'une longueur un peu moindre que celle du spectre lumineux lui-même. On peut dire que si cette teinte noire du rouge extrême ne se produisait pas, ce mode de préparation du chlorure permettrait de rendre le mieux possible les différentes teintes des rayons lumineux agissant sur la surface impressionnable.

Écrans incolores et colorés. — On a vu dans le livre précédent quelle était l'action des écrans incolores et colorés sur les matières impressionnables, et ce qui a été dit sur ce sujet s'applique au sous-chlorure d'argent, que l'on étudie dans ce chapitre. Ainsi les écrans incolores et transparents ne peuvent avoir d'action absorbante énergique que sur les rayons dont la réfrangibilité est moindre que le rouge ou plus grande que le violet, et laissent passer avec une égale intensité les rayons compris entre les réfrangibilités extrêmes A et H du rouge et du violet. Or, comme la matière impressionnable dont il est question ici donne les impressions colorées du spectre dans les parties correspondantes aux couleurs des rayons actifs, entre ces limites l'interposition d'un écran incolore et transparent sur la route des rayons, avant ou après leur réfraction, ne change pas les impressions prismatiques ; c'est ce que l'expérience vérifie.

Mais on vient de voir qu'en outre de cette action on pouvait observer sur les lames des traces de coloration au delà du violet, et une teinte amarante au delà du rouge surtout si le recuit n'est pas suffisant ; les écrans transparents pourront donc, suivant leur nature, agir sur les rayons ultra-violets et infra-rouges et même les absorber : un écran liquide de bisulfate de quinine, par exemple, mis sur la route d'un faisceau de rayons solaires avant sa réfraction arrête toute action à partir de H, et l'image du spectre obtenu se limite aux raies A et H. L'action remarquable de cet écran est très-précieuse, dans certains cas, pour la reproduction des images colorées de la chambre noire ; en effet, grâce à l'absorption que ce liquide fait éprouver aux rayons ultra-violets, la matière sensible n'est alors impressionnée qu'entre les mêmes limites de réfrangibilité que la rétine.

Il y a d'autres liquides, comme on l'a vu page 105, qui partagent avec la dissolution de bisulfate de quinine la propriété précédente, mais à un degré moindre ; ce sont la créosote, l'essence d'amandes

amères, etc. Parmi les solides, la dichroïte jouit aussi de cette faculté.

Dans certains cas, il serait nécessaire que l'on pût enlever la portion du rayonnement située au delà du rouge A, et qui agit en noircissant fortement les plaques; mais il n'y a pas d'écran incolore jouissant exclusivement de cette propriété; on peut bien s'opposer à l'action de la partie infra-rouge du spectre, mais on absorbe également une portion de l'extrême rouge. Il suffit pour cela de placer sur la route des rayons lumineux un écran liquide formé par une faible dissolution de sulfate de cuivre; une dissolution de 1 partie de sulfate de cuivre pour 100 d'eau, et qui est à peine colorée, donne lieu à cet effet. Les sels de cuivre jouissent, comme on le sait, de la faculté d'arrêter les rayons rouges extrêmes, tandis que d'autres écrans bleus, comme le verre bleu de cobalt, laissent passer la partie BA du spectre lumineux.

A l'aide du recuit, ainsi qu'on l'a vu plus haut, on peut également diminuer beaucoup cette action et quelquefois la faire disparaître.

La matière impressionnable se colorant dans le spectre de toutes les nuances de cette image, les écrans colorés, tels que les verres colorés, doivent imprimer leur couleur à cette matière lorsqu'on l'expose, sous ces verres, à l'action de la lumière diffuse ou solaire. Mais il est certaines précautions à prendre pour qu'il en soit ainsi : d'abord quand on se sert d'une plaque qui n'a pas été recuite, la lumière blanche donnant une teinte violette plus ou moins foncée, cette couleur, avec certains écrans, se mêle à la teinte produite par le verre coloré et masque la coloration que l'on doit observer. Il est donc nécessaire d'agir avec des plaques recuites convenablement, et même de placer sur les verres colorés un écran liquide incolore de bisulfate de quinine ou bien un de ceux qui ont été cités plus haut, afin que les rayons actifs plus réfrangibles que les rayons violets H ne viennent pas compliquer l'action.

On conçoit en effet qu'il soit bien plus important dans cette circonstance, qu'en prenant des impressions de spectre, de se servir de ces écrans, qui absorbent la partie ultra-violette de l'image prismatique; car dans le spectre la coloration grise est rejetée en dehors du violet, tandis que sous les verres colorés cet effet particulier se mêle à l'effet de coloration que l'on veut observer.

Les difficultés que l'on rencontre pour obtenir toutes les nuances des verres colorés sur les plaques recuites, et produire en même temps

une teinte blanche sous un verre blanc, sont les mêmes que celles qui ont été signalées précédemment à propos des impressions prismatiques : si la plaque est trop recuite, le verre blanc donne une image très-blanche ; mais les verres jaunes et verts produisent une impression jaunâtre. Si elle ne l'est que peu, les verres jaunes et verts donnent des impressions colorées comme leurs nuances ; mais le verre rouge produit une teinte amarante foncée, en raison de l'action des rayons rouges extrêmes, et le verre blanc donne une couleur grise.

Cependant, avec un peu de soin, on peut préparer une plaque qui reproduit assez bien les diverses nuances des verres colorés ; seulement, il ne faut pas s'attendre à avoir des couleurs comparables à celles que l'on obtient à l'aquarelle sur papier. Les teintes observées sont légères, mais assez visibles pour que des personnes habituées aux phénomènes d'optique puissent bien les apprécier.

Il est très-intéressant de reconnaître que non-seulement les rayons simples donnent leur nuance à la matière sensible, mais encore que la réunion de plusieurs d'entre eux la colore de la teinte qui résulte de leur mélange. On peut du reste se convaincre qu'il en est réellement ainsi ; il suffit de placer sur la route d'un faisceau de rayons solaires le verre coloré que l'on examine, avant de réfracter ce faisceau dans un prisme, et de recevoir sur la matière impressionnable le spectre produit par les rayons qui ont traversé ce verre : le spectre est alors composé de zones lumineuses plus ou moins séparées par des bandes obscures, et se reproduit exactement sur la plaque préparée, sauf les effets signalés plus haut et dépendant de la préparation de la matière elle-même. Ainsi le verre bleu coloré par le cobalt, s'il n'est pas trop foncé, présente un spectre interrompu par trois grandes bandes noires, placées l'une entre le rouge et l'orangé, la seconde entre l'orangé et le vert, et la troisième entre le vert et le bleu; si le verre était foncé, on ne verrait que deux taches lumineuses, l'une rouge, l'autre bleue et violette. En recevant sur une plaque préparée ce spectre interrompu, on trouve, au bout d'un temps qui dépend de l'intensité lumineuse, que l'image obtenue est la reproduction du spectre lumineux avec les espaces obscurs dans lesquels la plaque a conservé sa teinte propre.

Ce résultat, joint à la reproduction des raies principales du spectre, montre que du moment que les rayons lumineux d'une partie du spectre sont absorbés, toute action cesse sur la matière qui nous occupe ici, comme sur toutes les substances sensibles citées antérieure-

ment ; c'est une conséquence de l'unité de rayonnement comme on l'a déjà répété à plusieurs reprises dans cet ouvrage. Si les raies fines du spectre n'ont pas été reproduites de même qu'en faisant usage de l'iodure d'argent, cela tient probablement à une irradiation causée par l'épaisseur de la couche impressionnable.

§ 4. *Reproduction des images colorées de la chambre noire ainsi que des estampes coloriées.*

Si les différentes teintes du spectre lumineux sont reproduites sur le chlorure d'argent violet préparé avec toutes les précautions qui ont été indiquées, et si, d'un autre côté, la lumière blanche donne lieu à une impression blanche, les différentes teintes composées doivent donner des impressions de même couleur qu'elles. On obtient en effet facilement les images que produit la lumière polarisée en traversant les cristaux, les anneaux colorés, les franges d'interférences, etc. ; il suffit pour cela de projeter ces images sur des plaques semblables à celles qui ont servi aux expériences précédentes. Ce résultat se conçoit aisément, puisque les actions sont limitées aux extrémités visibles du spectre, et que les teintes des images obtenues sont analogues à celles des rayons actifs, simples ou mélangés.

Les anneaux colorés sont en même nombre et de mêmes nuances que ceux vus par projection. Cet effet n'a pas lieu, abstraction faite de la couleur, bien entendu, quand on opère avec d'autres substances impressionnables : en général, celles-ci sont sensibles entre d'autres limites de réfrangibilité que celles des rayons extrêmes qui agissent sur la rétine, et peuvent présenter alors des anneaux, des franges appartenant à des rayons principalement situés au delà du violet. Les effets obtenus avec le sous-chlorure d'argent tiennent à ce que ce composé, bien préparé, n'est sensible qu'entre les limites du violet et du rouge.

La question de la reproduction des images colorées de la chambre noire, ou, si l'on veut, le problème de peindre avec la lumière, m'a préoccupé dès mes premières recherches, et les essais tentés ont montré que ce but n'était pas impossible à atteindre. En 1848 (1), j'ai montré qu'en plaçant les plaques impressionnables au foyer d'une chambre obs-

(1) *Comptes rendus de l'Acad.*, t. 26, p 181, et t. 27, p. 485. — *Ann. de chim. et de physique*, 3e série, t. 22, p. 451.

cure, on pouvait avoir des impressions colorées représentant en partie les nuances de l'image. Mais du moment que les modifications dans la préparation ont donné une plus grande vivacité aux teintes produites par les rayons de différentes couleurs, il était évident que les images colorées seraient obtenues avec plus de netteté qu'auparavant. J'ai fait ainsi plusieurs reproductions; mais je dois signaler les causes qui se sont opposées à ce que les images soient comparativement aussi nettes que les épreuves si vives du spectre lumineux et des anneaux colorés.

D'abord les surfaces d'argent qui présentent le mieux les nuances des rayons différemment réfrangibles ont de 4 à 7 centimètres cubes de chlore par décimètre carré, et ont été soumises à l'action des rayons rouges extrêmes; le chlorure ainsi préparé est encore sensible aux rayons extrêmes rouges, et la lumière blanche donne une impression d'une teinte grise. Dans les images de la chambre noire, on a des teintes composées, plus ou moins mélangées de blanc; il est donc nécessaire que l'action de la lumière blanche ne vienne pas changer la nuance des rayons colorés dont la teinte est prédominante. Or, c'est ce qui n'a pas lieu dans ce cas; pour obtenir ce résultat il faut soumettre les plaques au recuit, et alors les clairs sont bien nettement obtenus.

On ne doit pas faire cette opération sans précautions, et il est nécessaire de suivre les indications données précédemment; sans cela, les teintes jaunes et vertes ne viennent pas. Si le recuit est lent, on peut avoir d'assez bonnes reproductions d'images colorées à la chambre noire; mais si l'on parvenait à préparer le sous-chlorure impressionnable de manière à ce que la lumière blanche pût agir aussi vivement et donnât la même impression blanche sur le chlorure non recuit que sur celui qui l'a été, on aurait des impressions colorées ayant des teintes aussi belles que celles du spectre solaire. On peut encore modifier la surface sensible à l'aide des rayons infra-rouges comme il a été dit page 219, et on arrive également à de bons résultats.

Un autre inconvénient s'oppose à la facile reproduction des images de la chambre noire : c'est le peu de rapidité avec laquelle le chlorure s'impressionne. Il faut éclairer vivement à l'aide des rayons solaires les objets que l'on veut reproduire, et malgré cette précaution il est nécessaire de prolonger l'exposition de la surface impressionnable au foyer de la chambre noire pendant plusieurs heures; quand on agit à la lumière diffuse, il faut un temps beaucoup plus long.

Si l'on applique sur une lame impressionnable une estampe coloriée de façon à ce que la partie peinte soit en contact avec la lame, que l'on presse l'estampe sur la plaque à l'aide d'une lame de verre, puis qu'on expose le tout à la lumière solaire ou diffuse, après un temps plus ou moins long, qui dépendra de l'intensité lumineuse et de l'épaisseur du papier de l'estampe, on trouvera celle-ci reproduite photographiquement avec ses couleurs sur la lame.

Mais ici il se présente les mêmes inconvénients que ceux qui viennent d'être signalés à propos des verres colorés; en même temps que les rayons compris entre le rouge et le violet, il peut passer, par transparence, au travers du papier des rayons infra-rouges et ultra-violets ou même de la lumière diffuse, de sorte que suivant les conditions de préparation de la surface impressionnable, et suivant les matières colorantes des estampes agissant comme écrans colorés, la reproduction des couleurs est plus ou moins bonne. Quelquefois même des couleurs foncées et presque noires donnent lieu à une impression noire, en raison du passage des rayons extrêmes qui impressionnent la surface, mais qui n'agissant pas sur la rétine ne sont pas appréciables pour les observateurs. Dans ce cas, il semble que les tons noirs soient reproduits photographiquement par des noirs; ce résultat, dont on se rend aisément compte, montre qu'il ne faut pas juger l'impression qui peut être produite sur une surface impressionnable d'après l'effet optique qu'un faisceau des rayons exerce sur la rétine, ces effets pouvant être différents même avec cette matière.

Quand on cherche à reproduire par décalcage les estampes coloriées, les couleurs vives se marquent seules d'une manière satisfaisante et les teintes pâles n'apparaissent que très-légèrement; on doit remarquer en effet que par ce procédé les couleurs transmises par l'estampe ne sont pas très-vives, et que la lumière diffuse pénètre à travers le papier et agit sur la plaque.

Pour avoir des blancs bien marqués il est nécessaire, comme pour la reproduction des images colorées de la chambre noire, de faire subir un recuit préalable aux plaques. Mais si le recuit est trop fort, les couleurs telles que le rouge, le bleu, le bistre, le violet, paraissent seules, et les jaunes et les verts sont à peine sensibles; si au contraire les plaques ne sont pas recuites, les jaunes et les verts deviennent apparents, mais le blanc ne se produit plus. Il faut donc se borner à un faible recuit ou à un recuit à plus basse température, comme on l'a

vu page 219, et risquer d'avoir des blancs plus ternes afin de faire venir en même temps les différentes couleurs. On peut même placer sur le verre qui couvre l'estampe une bouteille plate en verre bien transparent, remplie d'une solution de bisulfate de quinine à laquelle on peut ajouter une petite quantité de sulfate de cuivre; cet écran enlève alors les rayons ultra-violets ainsi que les rayons infra-rouges. Par cette addition, les blancs sont plus beaux.

Les peintures sur verre peuvent se reproduire sur les plaques par transparence, mais plus difficilement que les estampes en raison des causes d'erreur dues aux rayons extrêmes ainsi qu'on l'a expliqué plus haut à propos de l'emploi des verres colorés.

On peut également obtenir des estampes par décalcage sur papier, et l'on a décrit, page 217, une préparation qui permet d'atteindre ce but; mais avec le sous-chlorure formé sur le papier, jusqu'ici les reproductions, quoique faites avec facilité, ont donné des teintes moins belles et moins vives que sur plaques et sont aussi altérables (1).

§ 5. *Altération à la lumière des images photographiques colorées produites sur le sous-chlorure d'argent.*

Les images photographiques colorées du spectre et celles de la chambre obscure, une fois produites, peuvent se conserver indéfiniment dans l'obscurité; mais elles s'altèrent à la lumière, et le sous-chlorure d'argent continue à s'impressionner suivant la couleur des rayons avec lesquels on l'éclaire. Si l'on met une de ces images sous un verre rouge ou sous un verre bleu, l'image devient d'abord rouge ou bleue, pour disparaître par une action lumineuse prolongée en prenant un ton grisâtre plus ou moins foncé dans lequel on ne distingue plus aucune nuance.

Si on plonge une lame recouverte d'une image colorée du spectre ou de la chambre noire dans un des dissolvants du chlorure d'argent blanc, tel qu'une dissolution d'ammoniaque, d'hyposulfite de soude, de

(1) M. Niepce de Saint-Victor a préparé sur plaqué d'argent, depuis 1851, des reproductions d'estampes coloriées ou d'images de la chambre noire, d'après le premier procédé que j'avais découvert dès 1848; mais, cette méthode de préparation par immersion donnant des teintes moins vives que celle qui résulte de l'emploi des courants électriques, et les résultats qu'il a cités, et qui peuvent se rapporter à ce sujet, ne me paraissant pas différer notablement de ceux qui ont été indiqués précédemment et que j'avais obtenus antérieurement, il ne me paraît pas nécessaire de les mentionner (Voir *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 52, p. 834 (1851); t. 54, p. 215; t. 55, p. 694 et 698; et *Bullet. de la Société franç. de photographie*.

chlorure de sodium ou de chlorures alcalins, toutes les couleurs disparaissent, et il ne reste plus que la trace du spectre, ou le dessin de l'image de la chambre obscure, lequel se détache en blanc sur le fond bruni de la plaque d'argent. Ce dessin incolore montre qu'en même temps que la surface sensible s'est colorée, il y a eu réaction chimique, puisque cette trace blanche qui reste dans les endroits frappés par la lumière a tous les caractères de l'argent métallique en poudre très-ténue s'enlevant au moindre frottement. Ce résultat prouve en outre qu'au delà d'une certaine limite on ne peut produire sur la même plaque des images différentes par des alternatives d'exposition à des lumières diverses ; car après un certain temps, quand la surface a été impressionnée suffisamment, elle devient inhabile à donner des couleurs, étant chimiquement décomposée. En la traitant alors par une dissolution ammoniacale, la lame reste couverte d'une poussière d'argent métallique.

Lorsqu'on plonge ainsi dans une dissolution d'ammoniaque une lame recouverte de sous-chlorure d'argent et qui a une image du spectre assez vivement colorée, après la disparition de l'image la place occupée par le spectre apparaît comme une bande grisâtre sur le fond bruni de la plaque. En examinant cette trace avec attention lorsque la lame est encore humide, on voit que l'extrémité qui était rouge avant le lavage a une teinte verdâtre, tandis que l'extrémité auparavant violette tourne au bleuâtre : ces teintes sont complémentaires des premières; une fois la lame sèche, cet effet disparaît. On observe également le même phénomène immédiatement après l'immersion dans l'ammoniaque ou l'hyposulfite de soude des dessins colorés provenant de la reproduction des images de la chambre noire, lorsque la lame est encore humide; ainsi il y a tendance à la production des teintes complémentaires, surtout sur les parties précédemment rouges. Il est impossible, quant à présent, de rendre compte de ces effets.

Comment, dans l'état actuel de la science expliquer les effets de coloration des images photographiques avec les couleurs naturelles des rayons actifs? On a vu dans le livre précédent que le sous-chlorure d'argent quand il s'altère donne lieu à un courant électrique que l'on peut facilement apprécier ; or ce courant a toujours la même direction quels que soit le rayon lumineux actif et la coloration de la matière; cette circonstance, jointe à la production de la teinte grise uniforme que prend la substance dans tous les rayons quand l'action est suffisamment prolongée, montre que l'on ne saurait admettre autant de réactions dif-

férentes qu'il y a de couleurs dans le spectre. Il y a transformation chimique de la matière impressionnable et en même temps, temporairement, état physique différent de cette matière suivant la réfrangibilité des rayons actifs.

La lumière étant le résultat de vibrations transmises des corps lumineux jusqu'à la rétine, et chaque rayon du spectre correspondant à une vitesse de vibration différente, il peut se faire que la substance sensible qui a été impressionnée par un rayon, c'est-à-dire par des vibrations d'une certaine vitesse, ait acquis la faculté de vibrer plus facilement ensuite sous l'action des vibrations de même vitesse que celle de ce rayon. Ainsi il se produirait dans cette circonstance le même phénomène que celui qui se passe quand une réunion de sons vient frapper une corde tendue; il n'y a que les sons de même hauteur que celui rendu par la corde qui mettent celle-ci en vibration. De même, dans ces phénomènes un faisceau de lumière diffuse qui vient frapper une image colorée produite par la lumière, renfermant une masse de vibrations différentes, chaque partie de l'image vibrerait de préférence sous l'influence des rayons de même longueur d'onde que ceux qui ont agi pour la produire, et alors les rayons réfléchis par les divers points de cette image se trouveraient identiques à ceux qui lui ont donné naissance.

Mais comment se fait-il que d'autres substances chimiquement sensibles ne donnent pas lieu à des effets analogues, et qu'il n'y ait que la substance dont j'ai indiqué la préparation qui jouisse quant à présent de cette faculté de conserver les empreintes des rayons lumineux actifs? C'est ce que des recherches ultérieures pourront peut-être apprendre.

Les reproductions des images du spectre et de celles de la chambre noire avec leurs couleurs naturelles n'ont encore qu'un intérêt purement scientifique, et l'on ne peut songer à leur application actuelle, puisque ces impressions ne subsistent que dans l'obscurité et s'altèrent peu à peu à la lumière. Toutes les tentatives faites jusqu'ici pour empêcher cette altération n'ont pas réussi, et ce n'est que lors d'un état de passage que la matière sensible possède la propriété remarquable de conserver l'empreinte des rayons lumineux actifs; quand cette matière a éprouvé sa transformation complète, toute coloration a disparu. Trouvera-t-on le moyen de conserver ces images quand elles restent exposées aux rayons solaires? les arts pourront-ils s'enrichir d'images peintes par la lumière? C'est ce que l'on ne saurait affirmer actuellement.

Mon but en insistant sur ce sujet a été de faire connaître avec détails la préparation et les effets d'une matière quant à présent unique en son genre, qui a la faculté de reproduire les nuances des rayons lumineux actifs, et qui permet de *peindre avec la lumière*. D'après ce qui a été dit, on voit que l'on peut arriver à des effets déjà très-nets, et je ne doute pas qu'on ne puisse encore obtenir de meilleurs résultats, tant sont profondes les modifications physiques que l'on peut faire subir à cette matière impressionnable si remarquable.

LIVRE IV.

EFFETS PHYSIOLOGIQUES.

CHAPITRE PREMIER.

Effets produits sur les végétaux.

§ 1. *Effets généraux. Germination.*

La lumière exerce une action puissante sur les phénomènes de la vie végétale : les fonctions les plus importantes, celles relatives à la nutrition, ne peuvent avoir lieu sans son influence, et c'est par son intervention que le carbone se trouve fixé dans les végétaux ; c'est par sa présence également que certains mouvements sont imprimés à leurs organes et que les effets de coloration peuvent avoir lieu ; mais il est possible que quelques-uns de ces phénomènes ne soient que des effets secondaires dépendant de l'action chimique qui donne lieu à la fixation du carbone.

On a cherché qu'elle pouvait être l'influence de la lumière dans la plupart des phénomènes physiologiques de la végétation ; dans la germination, il ne semble pas que son action soit bien manifeste, si toutefois elle est appréciable.

La lumière n'est pas utile pour la germination, puisque des graines germent sous le sol ; son absence n'est pas non plus indispensable, puisqu'il y en a qui germent sur la terre. Les seules conditions nécessaires sont la présence de l'oxygène, et par conséquent l'accès de l'air et une certaine humidité ainsi qu'un degré convenable de température (1).

(1) Dans beaucoup de graines qui sont privées de la presence de l'air la vie est suspendue et non éteinte. On explique ainsi comment les terrains nouvellement défrichés,

La plupart des observateurs qui ont étudié l'action de la lumière sur la germination ont constaté l'action nuisible qu'elle paraît avoir; on peut citer d'abord Senebier (1) et Lefebure (2) ; puis MM. Poggioli (3), Ch. Morren (4), Hunt (5) et Zantedeschi (6).

Senebier se servit de grandes bouteilles en verre très-minces dont le fond remontait vers l'orifice et formait une espèce de cloche à double fond, à peu près comme les cloches dont on parlera plus loin; ces bouteilles étaient remplies d'eau colorée de façon à ne laisser pénétrer au-dessous que les rayons tamisés par les matières formant la dissolution. Il employa l'eau rougie par le carmin, l'eau colorée en jaune par le curcuma, et en violet par la teinture de tournesol. La germination de graines de laitue, d'épinards ou de haricots arriva d'abord dans les graines soumises à la lumière jaune, puis dans celles éclairées par la bouteille violette, ensuite dans les graines soumises à la lumière rouge, et enfin dans les graines tenues à l'obscurité.

On ne saurait arriver à une conclusion bien nette au moyen de ces expériences, quant à l'efficacité des divers rayons colorés, car les dissolutions employées ne se laissent pas traverser par des rayons homogènes, principalement la dissolution de tournesol, qui donne les extrémités violettes et rouges du spectre et n'absorbe que la partie moyenne de l'image prismatique. D'un autre côté, les graines ont pu être dans des conditions de température et d'humidité différentes, circonstances qui influent également sur la germination. Les écrans liquides sont très-propres à donner des rayons d'une réfrangibilité déterminée, mais encore faut-il les choisir et analyser avec soin la lumière transmise. Les couleurs bleues et violettes seraient obtenues par des écrans formés avec des sels de cuivre; on peut voir page 226 ce qui a été dit sur ce sujet.

les bords des tranchées profondes sur un sol longtemps intact, se couvrent presque toujours de végétaux nouveaux. Leur apparition indique que des graines enfouies à une époque reculée se sont conservées sans altération; elles germent lorsqu'elles ont le contact de l'air et que les conditions de température et d'humidité sont convenables.

(1) *Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière solaire*, t. 2, p. 55 (1782).

(2) De Candolle, *Physiologie végétale*, Paris, 1832, t. 2, p. 628.

(3) *Opuscules scientifiques*, Bologne, t. 1, p. 9 (1817). — Ouvrage cité par Dutrochet, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 18, p. 850.

(4) *Ann. des sciences naturelles*, partie botanique, t. 27, p. 201 (1832).

(5) *Philosoph. Magas.*, avril 1840. — *Bibliothèque univ. de Genève*, 2e série, t. 26, p. 409 (1840). *Id.*, t. 49, p. 383 (1843). *Id.*, t. 53, p. 394.

(6) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 18, p. 849.

MM. Ch. Morren, Hunt et Zantedeschi ont opéré à peu près par la même méthode, MM. Morren et Zantedeschi en étudiant la germination dans des boîtes fermées par des verres colorés, et M. Hunt en faisant usage d'écrans liquides colorés par du carmin, du chromate de potasse, de l'acétate de cuivre et du sulfate de cuivre ammonical. M. Ch. Morren a reconnu que parmi les différents verres colorés ceux qui se laissent traverser par des rayons d'un pouvoir éclairant assez considérable sont ceux qui favorisent le moins l'acte qui fait développer les organes rudimentaires des plantes. M. Hunt a vu également que les rayons les plus lumineux jaunes et verts nuisent à la germination comme au dévelopement de leur jeune âge, mais que la lumière bleue semble la hâter.

M. Zantedeschi observa que des graines de balsamine germèrent dès le second jour sous le verre vert, le troisième jour sous le verre violet, le quatrième jour sous les verres jaunes et orangés; le cinquième sous le verre bleu, et elles ne germèrent que le neuvième jour à l'air libre. Avec des graines d'*echinocactus Ottonis* la germination eut lieu en vingt-quatre jours dans les cases fermées avec les verres violet et bleu et dans la case à l'air libre; les graines germèrent en vingt-neuf jours sous le verre vert, et en trente sous le verre rouge.

Les conclusions de ces expériences, comme on le voit, sont contradictoires; mais non-seulement, comme on l'a déjà dit, les verres colorés qui n'ont pas été analysés avec soin ne donnent pas des rayons d'une réfrangibilité bien déterminée, mais encore les conditions d'humidité et de température n'ont peut-être pas été les mêmes dans chaque cas, ce qui ne permet pas de comparer entre eux ces divers résultats.

Les recherches de M. Poggioli ont été faites au contraire avec les rayons du spectre solaire; mais l'auteur s'est borné aux deux parties extrêmes du spectre, c'est-à-dire aux parties rouges et violettes; n'ayant pas d'héliostat, il fut réduit à déplacer à la main les vases où se trouvaient les graines ou les plantes soumises à l'action lumineuse. On indiquera plus loin quels sont les effets qu'il a observés sur les tiges des jeunes plantes; on doit seulement dire ici qu'il a reconnu que les graines de *brassica eruca*, germent plus promptement sous l'action des rayons rouges du spectre que sous l''influence des rayons verts, et plus promptement sous l'influence des rayons verts que sous celle des rayons violets. Les graines étant dans la même chambre et dans les mêmes conditions extérieures, les résultats semblent devoir être plus compa-

rables entre eux que les précédents; cependant, rien ne dit que l'échauffement de la partie rouge du spectre n'ait pas pu joindre son action à l'effet de la lumière?

D'après l'ensemble de ces observations, l'action de la lumière sur la germination paraît plutôt nuisible qu'utile, et les rayons les plus lumineux, qui, d'après ce que l'on verra plus loin, donnent lieu à la plus forte production de la matière verte, sont ceux qui retarderaient le plus l'apparition des tigelles. Il est possible que l'action de ces rayons tendant à favoriser la fixation du carbone soit contraire aux réactions qui s'opèrent dans les graines et qui exigent la présence de l'oxygène pour s'accomplir, la plante à l'état embryonnaire se comportant comme un corps oxydable et pouvant émettre de l'acide carbonique; mais aussitôt que les tigelles sont sorties de terre, la lumière peut agir alors efficacement, et l'on observe les effets qui seront indiqués dans un des paragraphes suivants; toutefois, si son action est trop vive, les jeunes plantes pourraient ne pas tarder à périr.

§ 2. *Inflexion des tiges et des racines sous l'influence de la lumière; nutation des plantes héliotropes.*

On sait que les jeunes branches ou les tiges herbacées des plantes élevées dans une chambre ou dans une serre se dirigent en s'infléchissant vers les croisées; on sait également que les plantes qui croissent à côté des murs tendent à s'en écarter et qu'en général les végétaux ont une tendance à se diriger vers la lumière. Bien plus, dans certaines plantes, le pédoncule qui porte la fleur ou la tête des fleurs se courbe du côté du soleil de façon à se pencher le matin à l'est, au milieu de la journée vers le sud, et le soir vers l'ouest, et à suivre ainsi le mouvement apparent du soleil; c'est là le phénomène que l'on a appelé nutation des plantes. Ce fait est très-facile à vérifier avec l'*helianthus annuus*, qui porte aussi le nom de tournesol.

Ces phénomènes ont dû être remarqués dès la plus haute antiquité, car Pline dans son histoire naturelle revient à plusieurs reprises sur ce sujet.

« Celui-là s'étonnera de ces phénomènes, dit-il (1), qui n'a pas re-
« marqué qu'une plante appelée tournesol regarde toujours le soleil

(1). Pline, *Hist. nat.*, livre 2, chapitre 14. — Traduct de M. Littré.

« qui s'en va, et tourne continuellement avec lui, même lorsque les « nuages le voilent. »

Et plus loin (1) : « Les feuilles de tous les arbres se retournent chaque « jour sous l'action du soleil, afin que les faces inférieures soient « échauffées. »

En parlant du lupin (2) : « D'abord il suit quotidiennement le soleil « dans sa révolution, et indique les heures aux laboureurs, même dans « un temps couvert. » Il suppose la nature disant à l'agriculteur (3) : « Je t'ai donné des plantes qui indiquent les heures, et afin que tu ne « détournes pas les yeux de la terre, même pour considérer le soleil, « l'héliotrope et le lupin tournent avec lui. »

Il parle encore, en différents passages (4), de l'héliotrope ainsi que de la quatrième tithymale appelée helioscopios (5) (*euphorbia helioscopia*) dont les sommités tournent également avec le soleil, comme son nom l'indique.

A l'occasion des pronostics des tempêtes, il dit (6) « qu'il est certain « que le trèfle se hérisse et dresse ses feuilles à l'approche de la tem- « pête ». Ce qui tendrait à faire supposer qu'on avait peut-être connaissance des mouvements qui constituent ce que l'on nomme aujourd'hui le sommeil des plantes.

Il faut distinguer l'inflexion des tiges des mouvements particuliers des feuilles ou des fleurs, c'est-à-dire des effets de sommeil ; on ne parlera dans ce paragraphe que des premiers effets. Ils n'ont commencé à attirer l'attention des botanistes que vers le milieu du siècle dernier ; Bonnet (7), dans ses recherches sur les fonctions des feuilles et sur le redressement des feuilles et la flexion des tiges, reconnut que cette flexion avait lieu dans les plantes submergées comme dans l'air. Il vit aussi que dans le gui les mouvements de retournement des feuille n'étaient pas appréciables, probablement, suivant lui, d'après une uniformité de composition des tissus formant les feuilles et les tigelles. Bonnet pensait que la flexion des tiges provenait d'une action calo-

(1) Pline, liv. 16, ch. 36.
(2) *Id.*, liv. 18, ch. 36.
(3) *Id.*, liv. 18, ch. 67.
(4) *Id.*, liv. 22, ch. 29.
(5) *Id.*, liv. 26, ch. 42.
(6) *Id.*, liv. 18, ch. 89.
(7) *Recherches sur l'usage des feuilles dans les plantes, etc.*; Gottingue, 1754.

rifique; mais Tessier (1) prouva par diverses expériences, faites dans des conditions calorifiques semblables, que la flexion des jeunes tiges de blé placées dans une cave et éclairées d'un côté, soit par une fenêtre, soit à l'aide d'un miroir réfléchissant la lumière diffuse extérieure, avait lieu par l'action de la lumière; ainsi l'agent lumineux seul donne lieu au phénomène dont il est question ici.

Voici du reste les principales conclusions de ses recherches :

1° « De quelque côté qu'on place les plantes qu'on élève, elles se tournent vers la lumière; si on les dérange de leur penchant naturel en plaçant les vases en sens contraire, d'abord leur extrémité, plus tendre que le reste, se retourne; le surplus de la tige prend, mais lentement et successivement, la même direction. Les feuilles se renversent lorsqu'elles sont à une certaine hauteur, et la plupart du côté de la lumière...»

2° « Que ce soit à la surface de la terre ou dans les souterrains, dans des appartements éclairés ou dans des lieux qui reçoivent peu de jour, qu'on sème des graines pour les élever, les jeunes tiges se pencheront toujours vers la lumière.... »

3° « La flamme d'une chandelle ne me paraît être autre chose que la lumière du jour dans un état différent. Il n'est donc pas étonnant que j'aie vu des plantes s'incliner vers cette espèce de lumière, moins fortement sans doute que vers la lumière du jour réfléchie..... »

Avant d'indiquer quels sont les effets divers qui peuvent se présenter avec différentes plantes ainsi que les explications que l'on a tenté de donner, il faut examiner quelles sont les parties du rayonnement lumineux qui interviennent dans la production de ces effets. On a déjà dit plus haut que M. Poggioli avait cherché quelle pouvait être l'action du spectre lumineux dans la flexion des tiges; mais il s'est borné à comparer les deux extrémités du spectre, et on ne peut conclure rien de positif de ses observations; les travaux de Payer (2) et de M. Gardner (3) ont éclairci ce point scientifique.

Payer a opéré sur de jeunes tiges de cresson alénois venues dans l'obscurité sur du coton humide, tiges qui se courbent et s'inclinent rapidement quand elles sont placées dans une pièce d'un apparte-

(1) *Mém. de l'Acad. des sciences.* t. 102, p. 133 (1783).
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* t. 15, p. 1195 (1842), t. 18, p. 32 (1844).— *Id, Rapport sur ces mémoires,* t. 16, p. 986.
(3) *Philosoph. Mag.*, janv. 1844.— *Biblioth. univ. de Genève,* 2e série, t. 49, p. 376 (1844).— *Id.*, t. 52, p. 381.

ment éclairée d'un côté par une ouverture, ou bien lorsqu'elles sont mises dans une boîte dont une des parois reçoit seule la lumière. Il a observé d'abord que lorsqu'on place dans cet appartement, ou dans cette boîte, une plante qui a poussé à l'obscurité et qui est verticale, la jeune tige se courbe d'abord, puis s'incline vers la lumière, c'est-à-dire qu'il y a deux effets successifs ; dans le premier, la partie inférieure de la tige est encore verticale et la partie supérieure plus au moins horizontale ; dans le second, la partie supérieure s'est un peu redressée et la partie inférieure légèrement inclinée, de sorte que la tige est redevenue droite et se trouve dirigée vers la lumière. Il a montré que pour qu'une plante se courbe ainsi du côté d'où vient la lumière, il n'est point nécessaire que le point de courbure soit directement éclairé; il a également observé que le milieu dans lequel se trouve la plante n'a d'influence que sur la vitesse avec laquelle la courbure s'opère, car au sein de l'eau (ainsi que Tessier l'avait déjà remarqué), comme dans une atmosphère d'azote ou d'hydrogène, la courbure finit toujours, avec des temps différents, par avoir le même degré, lorsque les autres circonstances sont égales d'ailleurs.

Examinant ensuite quels sont les effets produits lorsque les petites plantes au lieu d'être placées dans une boîte à une seule ouverture sont mises dans une boîte à deux ouvertures, et par conséquent reçoivent l'action de la lumière dans deux directions différentes, il a observé que si ces deux ouvertures se trouvent du même côté de la boîte, et que l'intensité des lumières soit égale, la tige se courbe dans la direction de la résultante, c'est-à-dire de la bissectrice de l'angle formé par les deux faisceaux de rayons; mais lorsque cette intensité est inégale, soit au moyen d'ouvertures d'étendue différente, soit au moyen d'écrans à l'une des ouvertures, la tige se courbe toujours dans la direction de la lumière la plus forte. Quand les ouvertures sont placées en face l'une de l'autre sur deux faces opposées de la boîte, les lumières d'intensité égale laissent la tige droite, et dans le cas d'inégalité la plante se courbe du côté de la plus intense. Il résulte de là que l'inflexion est la plus grande quand les rayons diffusés tout autour de la plante sont éliminés autant que possible, et que la lumière ne pénètre que par une ouverture dans l'enceinte où se fait l'expérience.

Pour étudier l'influence des rayons de différente réfrangibilité sur la production de ce phénomène, Payer a répété d'abord les mêmes expériences avec des boîtes fermées d'un côté par des verres colorés

bien analysés, puis en éclairant les plantes avec les différents rayons du spectre solaire rendu fixe au moyen d'un héliostat. Dans ce dernier cas, les tigelles de cresson étaient placées dans une boîte partagée en divers compartiments, et chaque compartiment était tapissé à l'intérieur de noir de fumée et n'offrait qu'une petite ouverture par laquelle était introduite le rayon coloré. Il a trouvé ainsi que sous l'action des rayons les moins réfrangibles, c'est-à-dire des rayons rouges, orangés, jaunes, verts, la plante se conduit comme à l'obscurité, et ne se courbe pas, tandis que sous l'action des rayons bleus et violets elle s'infléchit toujours.

Ainsi la partie active de la lumière pour opérer la flexion des tiges est surtout la partie la plus réfrangible du rayonnement lumineux, c'est-à-dire l'espace compris entre les raies F et H du spectre solaire, et le maximum d'effet a paru être placé dans le bleu, ou près de la raie G. Cette action, qui est la plus énergique dans la partie F H du spectre, doit s'étendre au delà de H dans l'ultra-violet et probablement du côté du vert, comme on le verra plus loin; mais Payer ne s'est pas occupé de vérifier ce fait.

M. Gardner a fait des expériences analogues quant à la flexion, mais en même temps il a cherché à démontrer que la partie du rayonnement lumineux qui donne lieu à ce phénomène n'était pas celle où les tiges des plantes se coloraient le plus vivement; en effet, l'inflexion est produite surtout par le bleu et le violet et est à son maximum dans la partie que l'on avait nommée l'indigo du spectre (c'est-à-dire vers la raie G), tandis que la couleur verte est développée de préférence par les parties orangées et jaunes et est à son maximum dans le jaune.

Il a employé des semis de navets, de raves, de moutarde, de pois, de fèves, des plants de *solanum nigrum* et *virginiacum*, de *plantago major* et *minor*, etc.; mais il a principalement fait usage des navets, ces plantes fournissant les meilleurs résultats. Il les semait et les laissait se développer dans l'obscurité jusqu'à ce qu'ils eussent atteint de 5 à 7 centimètres de longueur. En plaçant ces semis dans différentes boîtes exposées aux rayons d'un spectre, il pouvait juger des différents résultats obtenus. Si l'on se reporte à la description qu'il en donne, le spectre avec lequel il a opéré ne se présentait pas avec toutes ses raies; mais cette image ayant de 70 à 80 cent. de longueur était suffisamment étalée pour que les effets des divers rayons pussent être appréciables.

Il a reconnu d'abord, comme on le verra dans un des paragraphes

suivants, que la partie la plus lumineuse de l'image prismatique produit la coloration verte des plantes avec le plus d'intensité ; c'est également sous l'influence de ces rayons que se manifeste le plus grand dégagement du gaz oxygène. En exposant au spectre un semis de navets placés dans une boîte sans compartiment, il a vu les plantes se pencher vers un axe commun ; celles qui étaient exposées aux rayons rouges, orangés, jaunes et verts se sont inclinées vers le bleu foncé (indigo), tandis que les plantes éclairées par le violet se sont penchées à leur rencontre. L'expérience ayant été prolongée, le semis a pris l'apparence d'un champ de blé courbé par deux vents opposés; l'axe commun vers lequel se sont dirigées toutes les plantes est la ligne que suit le rayon indigo en allant du prisme au semis. Quant aux plantes qui étaient placées dans ces rayons bleus violets, elles se sont penchées vers le prisme; les autres se sont inclinées diagonalement de telle sorte que les plantes éclairées par le bleu et le violet ont été peu déviées de la ligne que suivaient les rayons qui les éclairaient. Dans cette expérience, la lumière diffusée sur les tigelles a peut-être agi comme éclairant les plantes voisines, et il reste à examiner, comme on le verra plus loin, quel peut être l'effet de compartiments placés entre les plantes.

M. Gardner a conclu de ses recherches, comme Payer, que les rayons les plus réfrangibles sont ceux qui opèrent principalement la flexion des jeunes tiges, le maximum d'action ayant lieu vers la raie G, les rayons rouges, orangés, jaunes et verts n'ayant aucune action appréciable; en outre de cela, ces rayons ne donnent pas lieu à la plus forte coloration verte des plantes, qui est à son maximum dans le jaune prismatique.

Il faut ajouter encore que M. Gardner a reconnu que l'effet était bien dû à une action de la lumière sur la tige, car il a lieu après l'enlèvement des feuilles; quant aux plantes penchées, elles se redressent dans l'obscurité, ce qui montre que le mouvement n'est que transitoire et n'est pas accompagné d'un changement permanent dans la structure de la plante. Les rayons de la lune peuvent également produire un mouvement sur des tiges en deux heures; les lumières artificielles peuvent agir de même, et une lampe d'Argant produit le même effet à peu près dans le même temps; du reste, on a vu que Tessier avait déjà observé ce fait.

Dutrochet (1), en répétant les expériences de Payer, a vérifié les

(1) *Mémoires pour servir à l'histoire physiologique des végétaux et des animaux*, t. 2, p. 61-1837. — *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 17, p. 1085; t. 18, p. 1169.

résultats indiqués plus haut relativement aux plantules de cresson alénois, mais il a annoncé que sous l'influence d'un verre rouge, si celles-ci ne présentent aucune inflexion, des tigelles d'un moindre diamètre peuvent être influencées; il a observé que dans ces conditions les *lepidium sativum*, *medicago sativa*, *medicago lupulina*, *trifolium pratense*, ayant des diamètres de tigelle compris entre 65 et 80 centièmes de millimètre, n'ont présenté aucun effet, tandis que le *senecio vulgaris*, l'*alsine media*, le *papaver somniferum*, etc., avec des diamètres compris entre 45 et 20 centièmes de millimètre, ont offert une inflexion. Il peut se faire que ces différences tiennent à ce que le verre rouge dont Dutrochet s'est servi ne laissait pas traverser des rayons homogènes; cependant, il est possible également que l'effet de flexion, bien que beaucoup plus faible en s'éloignant du maximum d'action, c'est-à-dire du violet, soit appréciable dans le rouge prismatique si l'intensité des rayons est suffisante et si la sensibilité des plantes est très-grande; nous verrons plus loin que d'autres expériences conduisent à cette dernière conclusion.

Dutrochet s'est occupé aussi de répéter les expériences de Payer et de M. Gardner sur le spectre solaire, et il a formé un spectre d'une intensité suffisante et dont les couleurs étaient bien étalées. Il a opéré avec les jeunes tiges de moutarde blanche ; il a vu que la courbure se produit d'abord dans le violet, là où se trouve l'action maximum, puis que le mouvement de flexion vers le prisme se montre dans les tiges soumises aux rayons bleus et dans l'ultra-violet, c'est-à-dire à droite et à gauche de la position du maximum. Ce n'est que plus tard que les tiges situées dans les rayons jaunes et verts se fléchissent, et enfin celles qui se trouvent exposées aux rayons rouges; pendant ce temps la flexion s'étend au delà du violet, à une distance qui est presque égale à celle du spectre visible. Lorsque l'intensité des rayons solaires est moindre ou que le spectre est formé par un faisceau moins large, alors la flexion des tiges vers le prisme ne se produit que dans la partie la plus réfrangible de l'image spectrale, et elle n'atteint pas les tiges éclairées par les rayons orangés et rouges ainsi que par la partie ultra-violette. Il pense donc que Payer n'avait pas opéré avec des spectres très-intenses, car ce physiologiste n'avait indiqué que les effets produits dans les parties où ils sont les plus énergiques, c'est-à-dire dans le bleu et le violet.

En même temps, Dutrochet a observé le phénomene de flexion latérale remarqué par M. Gardner et dont il a été question plus haut, phénomène qui ne commence à être appréciable qu'une demi-heure ou

même une heure après la manifestation de la flexion des tiges vers le prisme dans les rayons violets. Cette flexion latérale ou parallèle à la direction du spectre commence dans la partie jaune, et précède souvent dans ces rayons la flexion vers le prisme; elle a lieu aussi dans les rayons violets, où les tiges s'inclinent du côté des rayons bleus violets correspondant à peu près à la raie G; ces derniers sont les seuls sous l'influence desquels les plantes se dirigent uniquement vers le prisme. Comme le spectre est toujours accompagné de lumière diffuse, on peut se demander si les rayons actifs qui illuminent le prime ainsi que les tigelles qu'ils frappent, étant diffusés en tous sens n'agiraient pas alors sur les plantes.

Dutrochet a observé le fait suivant dans des circonstances qui sont à signaler, et qui excluraient l'hypothèse précédente : Il a pris un verre rouge qui, recevant un rayon solaire, ne transmettait que les rayons rouges; afin d'avoir la certitude de n'opérer qu'avec des rayons de cette réfrangibilité, ce verre étant placé devant l'ouverture de la chambre noire, le faisceau de rayons solaires transmis fut réfracté au travers du prisme, et on ne reçut sur un écran qu'une aire circulaire rouge; les autres parties du spectre n'étaient pas visibles, et étaient absorbées. De jeunes tiges de moutarde blanche placées dans cette aire de lumière rouge pure se courbèrent vers le prisme ou vers la lumière rouge, les premières au bout d'une heure, les dernières après deux heures et demie. Mais ce qu'il y eut de remarquable, c'est qu'il y eut une flexion latérale vers l'espace qui dans l'état ordinaire aurait dû être occupé par les divers rayons colorés du spectre, lesquels ici n'existaient pas. Ainsi, en outre de la flexion vers la lumière, il y avait une flexion latérale donnant à la plante la direction de la résultante des deux effets. Il faut ajouter que près de l'aire circulaire rouge, et dans les parties où se serait trouvé le spectre absorbé, il y avait d'autres tiges qui n'éprouvèrent aucune inflexion ni dans un sens ni dans l'autre.

M. Guillemin (1) a étudié le phénomène de flexion des tiges de cresson alénois et de moutarde blanche en se servant d'un spectre assez épuré pour séparer les différents rayons réfrangibles et en opérant avec différents prismes; mais il n'est pas nécessaire d'insister sur l'effet que peut avoir la nature des prismes, car on a vu, page 102 et suivantes, que les différentes substances incolores n'exercent d'action

(1) *Annales des sciences naturelles*, partie botanique, 4e série, t. 7.

absorbante que sur les rayons qui sont situés dans l'ultra-violet ou l'infra-rouge, c'est-à-dire en dehors du spectre visible.

Il a trouvé, comme Dutrochet, que si la flexion a lieu avec la plus grande force dans les rayons les plus réfrangibles, elle s'étend d'une part au delà du violet, et de l'autre dans le rouge et en deçà, de sorte qu'elle a lieu dans une étendue beaucoup plus grande que celle du spectre lumineux. Mais au lieu d'un maximum de flexion il en a trouvé deux : le premier, le plus énergique, a lieu dans la partie ultra-violette, entre H et I ; le second est dans le rouge, mais sa position est plus variable que le précédent, car il peut, suivant des conditions atmosphériques, se rapprocher du vert; entre ces deux maxima il y a un minimum d'action près de F dans le bleu.

D'après ces résultats, la flexion des plantes, comme la coloration de l'iodure d'argent (voir page 88) et des sels de cuivre (voir page 96) serait fort inégale dans le spectre, car les précautions que M. Guillemin a prises lui ont permis d'éliminer toute lumière diffuse et de séparer les différents rayons actifs, ainsi que de mieux préciser la position des maxima et minima d'action. Si MM. Payer et Gardner n'ont pas obtenu d'effet sensible en dehors des parties voisines du premier maximum, cela peut résulter de la dilatation de leur spectre, qui avait diminué l'intensité des régions de l'image prismatique, où les effets étaient moindres. D'un autre côté, l'empiétement des images formées par les rayons voisins peut expliquer aussi pourquoi la position du maximum dans leurs expériences a paru être dans le violet, tandis que M. Guillemin l'a trouvé à la limite de l'extrême violet, entre H et I. Les expériences de ce dernier opérateur ont donc permis de mieux analyser la position des parties actives du spectre qu'on ne l'avait fait avant lui.

M. Guillemin, comme M. Gardner et Dutrochet, a constaté la flexion latérale qui s'est étendue habituellement au delà des rayons rouges et violets; elle a eu pour centre, dans tous les cas, les rayons bleus foncés, c'est-à-dire la raie G. Souvent elle s'est produite malgré la présence des écrans, et pour l'empêcher il fallait en augmenter le nombre ou diminuer l'intensité du spectre.

Ce phénomène de flexion latérale s'exerçant malgré la présence d'écrans qui isolent les plantes est assez difficile à comprendre, et il faudrait s'assurer si dans les expériences il n'y a pas eu diffusion de la lumière dans quelques points, et si cette diffusion ne serait pas la

cause de la direction suivie par la plante; car il ne me paraît pas probable de supposer que la partie éclairée de la surface du cylindre qui forme la tigelle, ayant ses différents points soumis à des actions inégales, puisqu'à partir de chaque maximum les effets décroissent des deux côtés, la plante tout en s'infléchissant vers la lumière s'incline du côté de la partie du cylindre qui est la plus excitée ; c'est un point qui mérite d'être éclairci.

On voit, d'après ces recherches, que si le phénomène de flexion des plantes vers la lumière a lieu sous l'influence de rayons de longueur d'onde diverse, cependant il est à son maximum près du violet, c'est-à-dire dans la partie la plus réfrangible de l'image prismatique; en outre cette partie n'est pas celle dans laquelle se produit avec le plus d'énergie la coloration verte des plantes étiolées.

Cette action des rayons lumineux pour fléchir les jeunes tiges paraît à peu près générale; cependant on a indiqué quelques exceptions, et Knight (1) en observant les effets de la lumière sur les vrilles de la vigne vierge (*ampelopsis quinquefolia*), et du pois cultivé (*pisum sativum*), a expliqué leur enroulement en disant que frappées par la lumière elles se dirigent du côté opposé, et par conséquent vers les obstacles, autour desquels elles s'attachent. Ces organes fuiraient donc la lumière au lieu d'être fléchis vers les parties éclairées. Dutrochet (2), tout en admettant le fait, a cité une expérience d'après laquelle des tigelles de gui se sont dirigées du côté opposé à la lumière au lieu de se fléchir du côté éclairé. Il a montré également que plusieurs plantes grimpantes, telles que le houblon (*humulus lupulus*) et une tige de grand liseron (*convolvulus sepium*), placées dans des vases pleins d'eau dans une chambre éclairée par une fenêtre, se sont éloignées de la fenêtre en se courbant vers le fond de l'appartement. Ainsi, suivant les cas, les tiges des plantes pourraient se fléchir vers la lumière ou se diriger en sens contraire; mais on reviendra plus loin sur ce sujet.

Payer (3) a découvert que si les tiges des plantes s'infléchissent vers les sources lumineuses, les racines peuvent éprouver une action inverse et sembler fuir la lumière. Cette action n'est pas aussi générale

(1) *On the motions of the tendriels of plants; Philosoph. transact.*, 1812, t. 102.

(2) Ouvrage déjà cité, t. 2, p. 61.

(3) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 17, p. 1043. — *Rapport sur ce mémoire*, *id.*, t. 18, p. 1169.

que l'action contraire qui est exercée sur les tiges, car si toutes celles-ci s'infléchissent plus ou moins, toutes les racines ne fuient pas la lumière, et un certain nombre n'éprouvent aucune action de la part de cet agent.

Pour observer cet effet, d'après Payer, il suffit, dans une chambre éclairée par une fenêtre, de faire germer des graines de chou ou de moutarde blanche sur du coton flottant dans un vase rempli d'eau : en même temps que les tiges s'inclinent vers la lumière, les racines plongent dans l'eau, et se courbent en sens inverse, de façon que chacune des jeunes plantes représente assez bien la figure d'une *S*. Pour ces deux plantes ainsi que pour d'autres, ce phénomène se manifeste toujours, que ce soit la lumière diffuse ou la lumière solaire directe qui pénètre dans l'appartement. Mais il en est d'autres, telles que le *sedum telephium*, chez lesquelles une lumière diffuse ordinaire, bien qu'agissant fortement sur les tiges pour les incliner, n'a cependant aucune influence sur les racines, qui restent droites et qui ne fuient que les rayons directs du soleil. Pour d'autres enfin, comme le cresson alénois, les rayons directs du soleil, aussi bien que la lumière diffuse, sont sans action sur les racines. Il y a donc des différences très-grandes quant aux effets produits sur les racines.

Les expériences faites avec un spectre fixe ont montré à Payer que la partie la plus active était la même que celle qui agissait pour opérer le plus vivement la flexion des tiges, et il a énoncé ce fait que la région de l'image prismatique où les racines se courbent le plus est aussi celui où les tiges s'inclinent le plus, c'est-à-dire que pour une même plante le maximum d'action est le même pour les racines et les tiges. Il pense que cette action sur les tiges et les racines a une grande influence sur la tendance des tiges vers le ciel et des racines vers la terre.

Payer, dans ses recherches, a énoncé ce fait que la position du maximum d'action est variable pour les différentes plantes, mais que le phénomène de flexion a toujours lieu principalement dans la partie la plus réfrangible du spectre.

Dutrochet (1) a répété les expériences de Payer, les a vérifiées et y a ajouté quelques observations nouvelles : en opérant avec la moutarde blanche, comme ce physiologiste, la flexion des racines pour fuir la

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 18, p. 1169.

lumière lui a paru s'opérer exclusivement dans leur pointe ou dans leur spongiole, qui est la seule partie qui chez elles s'accroissent en longueur, en sorte qu'il pense que c'est en s'accroissant que ces racines se courbent. Si l'on retourne vers la lumière la pointe des racines qui se sont fléchies pour la fuir, la flexion acquise persiste, ce qui n'a point lieu pour les tiges, chez lesquelles la flexion précédemment acquise se renverse; c'est par la partie de leur pointe que l'accroissement a allongé que s'opère dans ce cas la nouvelle inflexion des racines pour fuir la lumière. Il a pu faire ainsi retourner jusqu'à quatre fois des racines de moutarde blanche, lesquelles demeurèrent disposées en zigzag, tandis que les tiges qui avaient subi également les renversements alternatifs de direction n'offraient qu'une seule courbure, celle qui était la dernière acquise, laquelle avait détruit la précédente.

Dutrochet vérifia aussi le fait découvert par Payer que les racines de certaines plantes, et entre autres de la moutarde blanche, éprouvent l'effet de fuite de la lumière principalement dans les rayons les plus réfrangibles, c'est-à-dire dans les rayons violets et bleus. Plusieurs expériences faites avec un spectre fixe et bien étalé lui ont donné le même résultat. Pour opérer facilement, les jeunes plantes de moutarde blanche étaient placées dans de petites ouvertures faites à des lames minces de liége qui flottaient sur l'eau contenue dans des vases en verres à faces parallèles. La longueur des racines soumises à l'influence lumineuse était de 20 à 24 mill. Trois heures après le commencement de l'expérience, la flexion en arrière et en crochet de la pointe des racines a commencé dans les rayons violets, lieu du maximum d'action; quelque temps après, cette même flexion s'observait dans le bleu et dans l'ultra-violet. La fuite de la lumière, toujours par la pointe des racines, se manifesta pendant les heures suivantes dans les autres rayons du spectre.

Six heures après le commencement de l'expérience, Dutrochet observa d'abord dans les rayons jaunes et ensuite dans l'orangé une flexion latérale de la pointe des racines, flexion dirigée vers l'espace éclairé par les rayons rouges. Cette flexion, se combinant avec celle de la fuite de la lumière qui la croisait à angle droit, il en résultait que les pointes des racines étaient courbées en crochet suivant la résultante de ces deux tendances. Ainsi voilà une flexion latérale analogue à celle que Gardner avait observée avec les tiges, et dont on a parlé plus haut.

Les corps des racines ne changèrent nulle part de position; leurs

pointes seulement, dans l'étendue de 3 à 4 millim., se courbèrent en crochet. Or, d'après Dutrochet, cette étendue était la longueur dont elles s'étaient accrues pendant les plusieurs heures d'expériences, de sorte qu'il a admis que la double flexion s'était opérée dans la partie récemment produite par l'allongement des racines.

Il faut examiner actuellement comment les botanistes ont cherché à expliquer ces effets si curieux : d'après Senebier (1) la tendance des tiges vers la lumière pourrait provenir du dégagement de gaz produit par l'action solaire; mais on verra que ce ne sont pas les rayons de même réfrangibilité qui donnent lieu avec la même intensité à ces deux ordres d'effets. De Candolle (2) a pensé que le phénomène de courbure ou de tendance des tiges rentrait dans les lois connues de l'étiolement; car, disait-il, la moitié non éclairée de la tige, étant étiolée, s'allonge plus que les autres parties, tandis que la portion éclairée prend un moindre développement; de là la courbure du côté de la lumière. Mais les expériences faites avec les différents rayons réfrangibles, et dont il vient d'être question, sont complétement contraires à cette hypothèse, car la coloration verte et par conséquent les phénomènes de respiration sont dus aux rayons les moins réfrangibles, c'est-à-dire aux rayons jaunes et verts, tandis que l'inflexion est produite principalement par la partie violette de l'image prismatique. D'un autre côté, comme les plantes étiolées s'allongent plus que les autres, la moitié non éclairée d'une tige deviendrait active pour la courber vers la lumière, ce qui est contraire aux expériences, comme on va le voir.

Dutrochet (3) a montré en effet que c'était le côté éclairé qui était actif pour opérer la courbure : ayant pris des tiges herbacées qui, placées dans une pièce éclairée, s'étaient courbées vers la lumière, il les a fendues en deux moitiés longitudinalement dans le sens de la courbure, et de façon à séparer dans chacune la partie qui avait été éclairée de la partie opposée. A l'instant de la séparation, pour chaque tige, la moitié située du côté concave a pris une courbure plus grande, tandis que l'autre partie s'est redressée et ensuite n'a pas tardé à se courber en sens inverse. Ainsi, la flexion est due à la partie éclairée. Mais comment peut-elle s'opérer? Suivant ce physiologiste cette incur-

(1) *Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière solaire, etc.*, t. 2, p. 285 (1782).

(2) *Mém. de la Société d'Arcueil*, t. 2, p. 109 (1809).

(3) *Mémoires pour servir à l'hist. anat. et phys. des végétaux*, t. 2, p. 60 (1837).

vation s'effectue par l'action de deux tissus différents : le tissu cellulaire ou parenchimeux, et le tissu fibreux. Le tissu cellulaire se courbe par turgescence ou par implétion de liquide ; le tissu fibreux par oxygénation. D'après cela, l'action de la lumière augmentant la transpiration, diminue la turgescence de la partie du tissu cellulaire éclairée, de sorte que sa force d'incurvation est diminuée ; la force d'incurvation du tissu fibreux par oxygénation est au contraire augmentée par l'action lumineuse, de façon que la tige doit s'infléchir. Cette explication ne saurait être satisfaisante, car elle s'appuie sur une hypothèse non encore démontrée, l'action de l'oxygène sur le tissu fibreux ; d'un autre côté, si la transpiration ainsi que la respiration sont influencées par la lumière lors des réactions dues à la nutrition, ces réactions ont lieu principalement dans la partie la moins réfrangible de la lumière, laquelle ne donne pas lieu aux effets d'inflexion qui sont à leur maximum sous l'influence des rayons violets.

Depuis Dutrochet, M. Ratchinski (1) a essayé d'expliquer la tendance des tiges vers la lumière ; il a cru d'abord devoir conclure, contrairement aux idées de Dutrochet, que le système médullaire n'a aucune action et que la tendance à l'incurvation en dehors qu'offrent les tiges herbacées est déterminée par le système cortical. Suivant lui, le liber ne joue aucun rôle ; mais le parenchyme de l'écorce, qui est la partie active, est composé de deux couches : la couche extérieure située immédiatement au-dessous de l'épiderme qui renferme peu de chlorophylle, et qui se confond quelquefois avec la couche intérieure de l'écorce, et la couche intérieure du parenchyme, qui est un tissu dans lequel a lieu un travail chimique très-actif d'assimilation. Ce serait donc alors par la turgescence de ce parenchyme interne de l'écorce, qui augmenterait sous l'influence de la lumière, que le phénomène d'incurvation aurait lieu, malgré la tendance en sens contraire, mais plus faible, qui existerait de l'autre côté de la tige.

Il a fait remarquer à cette occasion que les familles des chénopodées, des amarantacées, des malvacées, qui se distinguent par le développement du stratum interne de leur écorce, offrent beaucoup de plantes héliotropes ; les composées, dont le tournesol fait partie, sont aussi dans ce cas. D'un autre côté, les plantes monocotylédones, qui ont

(1) Notice sur quelques mouvements opérés par les plantes sous l'influence de la lumière. *Bulletin de la Société impériale de Moscou*, t. 30, 2me partie, p. 221, 1857.

ce tissu peu développé, ont une tendance moins prononcée à se fléchir vers la lumière.

Ces hypothèses sont basées sur la turgescence des tissus produite directement ou secondairement par des réactions chimiques dues à la lumière. Mais quelles seraient ces réactions? Sont-ce les effets qui conduisent à la formation de la matière verte et à l'émission de gaz oxygène? Or, comme on l'a déjà dit, les rayons sous l'influence desquels ils ont lieu sont surtout compris dans la partie la moins réfrangible du spectre, tandis que ceux qui donnent lieu à la flexion sont principalement les rayons bleus et violets. Ce ne serait donc que des réactions qui se manifesteraient dans cette dernière partie de l'image prismatique, et qui n'auraient pas encore été définies jusqu'ici, qui donneraient lieu à ces divers effets.

Il résulte de tout ce qui précède que, les phénomènes de la vie végétale étant extrêmement complexes, si la lumière exerce une action manifeste sur l'excitabilité des plantes, il faut attendre pour chercher à donner une explication satisfaisante des effets observés que l'on soit plus avancé dans l'étude de toutes les circonstances de ces curieux phénomènes.

§ 3. *Mouvements divers. — Sommeil des fleurs et des feuilles. — Enroulements.*

La lumière exerce une influence sur divers mouvements exécutés par les organes des plantes, et dont il est nécessaire de parler ici; si l'on n'a pas étudié l'action des différentes parties du rayonnement comme dans les effets d'inflexion, cependant plusieurs physiologistes sont arrivés à des résultats intéressants relativement à l'intervention lumineuse. Les mouvements dont il va être question sont ceux qui constituent ce que l'on nomme le sommeil de plantes et les enroulements des tiges flexibles.

Fleurs. — On désigne sous le nom de sommeil la position particulière que les fleurs et les feuilles de certaines plantes prennent pendant la nuit, comparativement à la position qu'elles occupent pendant le jour. Les fleurs d'un grand nombre de plantes ne présentent pas cet effet; elles s'épanouissent et se conservent en cet état jusqu'à la mort de la corolle, qui se flétrit et tombe sans s'être fermée. D'autres s'ouvrent une seule fois, n'ont qu'une seule occlusion ou qu'un seul sommeil, qui précède

immédiatement la mort de la corolle; telles sont les fleurs des cistes, des *mirabilis*, des *convolvulus*, etc.; on les appelle éphémères, et on peut distinguer les éphémères diurnes et les éphémères nocturnes. D'autres fleurs, enfin, s'ouvrent et se ferment plusieurs fois en présentant pendant plusieurs jours les alternatives des deux positions de réveil et de sommeil; telles sont les fleurs des ficoïdes, des chicoracées et de beaucoup de synanthérées.

Linné a le premier étudié ces phénomènes (1), en se bornant à noter les heures diverses auxquelles les fleurs s'épanouissent et se ferment, et a composé ce qu'il a appelé l'horloge de Flore; mais il n'a pas cherché quelle pouvait en être la cause. De Candolle (2) a soumis un certain nombre de fleurs à l'influence d'une lumière artificielle, et sur plusieurs d'entre elles a observé des résultats curieux; pour suivre ces expériences au Muséum d'histoire naturelle, il a placé les plantes dans deux caveaux à l'abri de la lumière du jour dont la température était maintenue en moyenne à 20°; l'un est resté obscur, l'autre était éclairé par la lumière de six lampes qui, éclairant chacune comme neuf bougies, donnaient une lumière équivalente à celle de cinquante-quatre bougies.

Les fleurs éphémères n'ont pas été influencées de la même manière; on sait que les cistes fleurissent le matin, et que leurs fleurs tombent au plus tard dans l'après-midi. Les cistes placés dans l'obscurité ont fleuri plusieurs fois de suite à la même heure qu'en plein air; mais dans quelques espèces la floraison a duré davantage, et quelques-unes se sont fermées avant de tomber, ce qui n'arrive jamais à ces fleurs. L'effet de la privation de lumière a donc été de prolonger leur épanouissement.

Les œnothères fleurissent le soir, et commencent à passer le lendemain matin. Plusieurs de ces plantes ont été placées dans le caveau éclairé au moment où des fleurs de chacune d'elles venaient de s'épanouir. L'*œnothera tetraptera* a commencé à se flétrir une heure après; mais malgré la continuité de la lumière, le lendemain, à son heure ordinaire, elle a épanoui deux fleurs qui ont duré pendant le même temps que celles des individus restés à l'air libre. L'*œnothera suaveolens* (onagre odorante), loin de conserver sa fleur douze à quatorze heures comme à l'air libre, ne l'a perdue qu'au bout de quarante-huit heures; le lendemain, à son

(1) Voir *Somnus plantarum*, *etc.*, et ouvrages cités plus loin.

(2) Expériences relatives à l'influence de la lumière sur quelques végétaux, *Mémoire des savants étrangers de l'Institut de France*, t. Ier, p. 329, 1805.

heure ordinaire, elle a épanoui deux nouvelles fleurs, qui n'ont duré que vingt-quatre heures ; l'*œnothera anomala* s'est fermée à son heure ordinaire, et ne s'est pas rouverte.

Les belles de nuit (*mirabilis jalappa*) ont subi une action plus régulière : à la lumière continue des lampes elles ont développé leurs fleurs le soir à l'heure accoutumée, ou un peu plus tôt, et les ont fermées le matin un peu plus tard qu'à l'ordinaire ; il en a été de même à l'obscurité continue. Mais on a, pendant trois jours de suite, allumé les lampes à huit heures du soir et on a les éteintes à six heures du matin, de façon à intervertir pour ces plantes les heures de jour et de nuit. Pendant vingt-quatre heures la floraison des belles de nuit n'a offert aucune variation régulière, mais ensuite ces plantes se sont mises à fleurir le matin et à se fermer le soir contrairement à ce qu'elles sont à l'air libre. Ainsi, dans ces trois genres de plantes à fleurs éphémères, les *mirabilis jalappa* seules ont manifesté des changements dans les heures d'éveil et de sommeil, par suite de l'action de la lumière ; on ne peut dire qu'il n'y ait pas d'influence dans les autres cas, mais il serait possible que l'intensité de la lumière dont on a fait usage n'eût pas été suffisante, et que chacune de ces plantes exigeât des intensités différentes pour manifester l'influence lumineuse.

La même réflexion peut s'appliquer aux expériences faites par de Candolle avec les fleurs qui s'ouvrent et se ferment plusieurs fois, car plusieurs d'entre elles ont indiqué une action de la lumière, tandis que d'autres n'ont présenté que des effets irréguliers : L'*ornithogallum umbellatum* s'ouvre à onze heures le matin et se ferme à trois heures après midi; pendant quatre jours un rameau de cette plante mis dans l'eau et transporté fréquemment d'un lieu éclairé à un lieu obscur s'est toujours ouvert au jour et fermé à l'obscurité.

Des rameaux de *convolvulus purpureus* en boutons, ayant été exposés à la lumière continue des lampes à huit heures du soir, à dix heures les fleurs se sont ouvertes comme celles qui étaient restées à l'air libre ; mais tandis que cette fleur se ferme habituellement à midi, celles du caveau éclairé se sont fermées à sept heures du matin; elles ont refleuri à six heures du soir, et se sont fermées à minuit. Ainsi la continuité de la lumière a hâté les périodes pendant lesquelles s'exécutent les mouvements de ces fleurs. Au contraire, les *convolvulus arvensis* et *cneorum*, ayant été exposés fermés à la lumière se sont ouverts à leur heure ordinaire, et ne se sont point refermés. Le *convolvulus cneorum*

mis ouvert à l'obscurité s'y est fermé à son heure accoutumée, et ne s'est point rouvert.

Parmi les ficoïdes, les *mesembryanthemum cordifolium, echinatum* et *hispidum* se sont fermés, et ne se sont jamais ouverts soit à l'obscurité, soit à la lumière continue des lampes, soit à la lumière intermittente, soit à une température de 25° à 35°. Mais il faut remarquer qu'à l'air libre ces espèces ne fleurissent qu'en plein soleil et ne s'ouvrent pas si le temps est couvert. Plusieurs autres espèces de *mesembryanthemum* ont manifesté recevoir une impression irrégulière de la part de la lumière, mais le *mesembryanthemum noctiflorum*, exposé à la lumière des lampes pendant la nuit et à l'obscurité pendant le jour, s'est épanoui le matin et fermé le soir, tandis qu'à l'air libre il s'ouvre le soir et se ferme le matin.

Ces expériences, qui montrent que les périodes de réveil et de sommeil des fleurs peuvent être modifiées ou interverties, sont très-intéressantes, et elles demanderaient à être répétées avec des intensités lumineuses plus grandes encore que celles des lampes dont a fait usage de Candolle, les différentes plantes étant inégalement impressionnables ; elles mettent en évidence l'influence que peut avoir la lumière dans ces mouvements qui ne sont probablement qu'un effet secondaire, mais en rapport avec les actions physiologiques sur lesquelles la lumière exerce son action.

Dutrochet (1) s'est occupé de ce sujet, et l'explication de ces mouvements des corolles lui a paru analogue à celle de l'inflexion des tiges vers la lumière. Il pense en effet que c'est par turgescence des cellules que l'épanouissement de la corolle a lieu, tandis que l'occlusion de la fleur ou la courbure en dedans est due au tissus fibreux. Ce serait donc à l'action alternativement prédominante de deux tissus organiques que le phénomène serait dû. Mais les mêmes observations peuvent s'appliquer ici comme à la flexion des tiges ; la courbure du tissu fibreux est-elle due à l'action de l'oxygène ?

Dutrochet cite comme preuve à l'appui l'expérience suivante : si l'on place sous la cloche d'une machine pneumatique des fleurs susceptibles de sommeil ou de réveil, et qu'on fasse le vide sous cette cloche, les fleurs conservent constamment celui des deux états qu'elles possèdent quand on les place sous la cloche. En vain les place-t-on au so-

(1) *Mémoires* déjà cités, t. 1, p. 469 et suiv.

leil, ou les laisse-t-on dans l'obscurité, le même effet est observé. Il a fait ces expériences avec les fleurs du *leontodon taraxacum*, du *sonchus oleraceus*, et du *convolvulus arvensis*. Ces fleurs avaient leurs pédoncules plongés dans l'eau ; mais dans ce cas les conditions physiologiques des plantes ne sont plus les mêmes, et dès lors leurs fonctions ne peuvent plus s'opérer comme à l'ordinaire.

M. H. Hoffmann (1) a fait plusieurs expériences pour soumettre des feuilles et des fleurs qui présentent les phénomènes de sommeil à l'influence des rayons de diverses couleurs. Seulement, il a opéré avec des verres recouverts de papier de couleur imbibés d'huile, c'est-à-dire d'après un moyen très-imparfait, puisqu'on ne peut affirmer quels sont les rayons différemment réfrangibles qui ont traversé ces écrans. Il a observé que les fleurs du *tolpis barbata* s'éveillent plus tôt sous l'influence de la lumière bleue et de la lumière jaune que de la lumière rouge; quant au sommeil, il se manifesta plus tôt sous l'action de la lumière rouge et de la lumière jaune que sous l'action de la lumière bleue ou que sous celle de la lumière du jour. Les rayons les plus réfrangibles paraîtraient donc retarder le sommeil et activer le réveil, et les rayons les moins réfrangibles au contraire prolonger le réveil et retarder le sommeil.

M. Hoffmann a observé qu'une forte lumière artificielle peut éveiller pendant la nuit les fleurs du *galanthus nivalis;* mais il a remarqué que d'autres fleurs placées dans l'obscurité ont manifesté des mouvements analogues à ceux qui se produisent à l'air libre. Des fleurs d'*œnothera lindleyana,* et du *tolpis barbata,* plongées sous l'eau, ont présenté à peu près les mêmes heures de sommeil et de réveil que dans l'air.

Ces alternatives de mouvement d'après M. Ch. Royer (2) dépendent de la turgidité de la corolle, et ce serait la face interne, surtout aux points situés près du tube ou de l'onglet, qui serait le siége du mouvement. En plaçant des plantes dans des conditions favorables de chaleur et d'humidité, il a pu empêcher le sommeil; ainsi des fleurs de *bellis perennis* exposées dans un four à la température de 25° sont restées épanouies pendant quatre jours et quatre nuits. Mais, de même que dans l'expérience des fleurs placées dans le vide, faite par Dutrochet, ces actions mettent la plante dans d'autres conditions physiologiques et n'excluent pas l'action de la lumière.

(1) *Ann. des sciences naturelles,* partie botanique, 3e série, t. 14, p. 310 et 330 (1850).
(2) *Bulletin de la Société botanique de France,* t. 12, p. 31 (1865).

Feuilles. — On a observé depuis longtemps que les feuilles de certaines plantes prennent pendant la nuit, par rapport aux branches, une position différente de celle qu'elles ont pendant le jour. On a cité, page 239, un passage de Pline qui tendrait à montrer que l'on avait remarqué très-anciennement quelques effets de ce genre ; dans le seizième siècle, V. Cordus et Garcias de Horto (1) parlèrent de ces changements, que le premier avait observés dans le glycyrrhiza et le second dans les folioles du tamarin; mais depuis le milieu du siècle dernier ce phénomène a particulièrement attiré l'attention des botanistes.

Bonnet (2), comme on l'a vu antérieurement, qui avait observé le phénomène si curieux du retournement des feuilles quand on les place momentanément, et par l'action d'un effort extérieur, de façon à ce que la partie supérieure soit située en dessous, chercha à expliquer ces effets, ainsi que la position des feuilles dans l'état de sommeil ou de réveil, par l'action calorifique due au rayonnement solaire : cette action, suivant lui, desséchait inégalement les surfaces des feuilles.

Linnée (3) entreprit des observations sur ce sujet, étudia les formes diverses sous lesquelles le sommeil se présente dans les végétaux, et sous ce rapport rangea ces derniers dans plusieurs classes. Il parvint, entre autres, aux conclusions suivantes :

1° Les jeunes plantes offrent des mouvements plus marqués que lorsqu'elles sont plus âgées.

2° L'absence seule de lumière cause le sommeil des feuilles, et le froid de la nuit n'en est pas cause, car dans les serres chaudes les plantes sont soumises à cette espèce de repos.

3° Les feuilles suivant les plantes se replient d'une manière différente.

Ainsi l'action de la lumière était bien reconnue, et il était admis que son absence donne lieu à la disposition des feuilles pendant la nuit.

La plupart des recherches faites depuis cette époque pour avoir l'explication du mouvement des feuilles ont porté sur les plantes qui présentent ce phénomène au plus haut degré et surtout sur la sensitive (*mimosa pudica*), dont les mouvements des feuilles et des tiges peu-

(1) De Candolle, *Physiologie végétale*, t. 2, p. 854.
(2) Bonnet, *Recherches sur l'usage des feuilles* ; Gœttingue (1754).
(3) *Somnus plantarum* (1755). — *Amœnit. academ.*, 4ᵉ vol., p. 333. — *Journal de physique*, t. 1ᵉʳ, p. 379 (1773).

vent être produits par un grand nombre de causes excitatrices. J. Hill (1) fit à ce sujet des recherches avec l'abrus (espèce de pois d'Égypte) et la sensitive. En plaçant ces plantes dans une pièce éclairée et en les approchant plus ou moins de la fenêtre, il parvint également à cette conclusion que la lumière seule est la cause de ce changement, et que ce que l'on appelle le sommeil des plantes n'est dû qu'à l'absence de lumière. Il ne chercha pas à expliquer l'effet produit, car il énonça simplement l'idée que le réveil était dû à l'excitation, par l'action lumineuse, des fibres qui existent dans le pétiole.

Lindsay (2), étudiant les changements de position des feuilles de la sensitive, fit voir que le renflement qui existe à la base du pétiole est le siége de la mobilité ; suivant lui, c'est même la partie supérieure seule qui agit, car l'ablation de la moitié inférieure n'empêche pas l'abaissement du pétiole pendant la nuit, ce qui montre que ce n'est pas la contraction de cette dernière partie qui est cause du phénomène.

De Candolle (3), lors de ses expériences sur le sommeil des fleurs, a soumis également des sensitives ainsi que d'autres plantes à l'action de la lumière de plusieurs lampes pour étudier son influence sur le mouvement des feuilles. Avec les sensitives les effets ont été très-nets et ont conduit aux conséquences suivantes :

1° En exposant pendant plusieurs jours des sensitives à la lumière des lampes pendant la nuit et à l'obscurité pendant le jour, dans les premiers temps ces plantes ont fermé et ouvert leurs feuilles sans règle fixe; mais au bout de quelques jours elles ont ouvert leurs feuilles le soir à l'instant où la lumière artificielle commençait à agir, et les ont fermées le matin, qui était l'heure où leur nuit commençait.

2° Des sensitives exposées à une lumière continue ont présenté, comme dans l'état ordinaire, des alternatives de sommeil et de réveil; mais chacune de ces périodes était un peu plus courte qu'à l'ordinaire. L'accélération a été sur plusieurs pieds de une heure et demie à deux heures par jour.

3° Les mêmes plantes placées à l'obscurité continue ont offert des alternatives de sommeil et de réveil, mais très-irrégulières.

(1) *The sleep of plantes*..., Londres (1757), 2e édit. (1762). — *Journal de physique*, t. 1er, p. 377.

(2) *Biblioth. of the Royal Soc*, juillet, 1790. — *Bulletin de la Société des nat. de Moscou*, t. 30, 2e partie (1857), p. 237.

(3) Déjà cité. *Mém. des Savants étrangers de l'Institut de France*, t. 1er. — *Physiologie végétale*, t. 2, p. 860.

Il a obtenu des effets analogues, quoique moins évidents, avec d'autres mimosas; mais avec quelques plantes il n'a pu observer aucune action : ainsi, il n'a pas pu modifier le sommeil des *oxalis incarnata* et *stricta*, ni par l'obscurité ni par la lumière continue des six lampes, qui suffisaient pour les autres expériences. L'action excitatrice de la lumière dépend donc évidemment du degré d'impressionnabilité des plantes, et les mêmes effets ne peuvent être obtenus dans diverses plantes que par des intensités lumineuses différentes.

On doit encore mentionner au sujet de l'action de la lumière sur la sensitive les observations de M. Daubeny (1), d'après lesquelles un certain degré d'intensité de lumière est nécessaire à la santé de la plante, qui, lorsqu'elle n'est soumise qu'à l'action des rayons bleus ou violets, perd sa sensibilité aussi promptement que si elle était soustraite à l'action de la lumière.

Dutrochet (2) a fait également sur ce sujet des expériences intéressantes, mais dans le but d'expliquer les mouvements produits par la lumière. Il a montré que c'est sur le renflement moteur ou sur le pétiole des folioles qu'agit la lumière pour déterminer le réveil par sa présence ou le sommeil par son absence.

L'expérience a été faite avec le haricot, qui est parmi les plantes indigènes celle dont la feuille offre le plus de facilité pour l'étude de ces phénomènes, en raison de la grosseur de ces renflements. Dans le sommeil, les folioles du haricot dirigent leur pointe vers la terre : leur plan est alors vertical; dans le réveil, le plan devient horizontal; cependant la nutation des feuilles tend à diriger leur face supérieure vers le soleil. Pour montrer que le limbe de la feuille n'a pas d'influence sur le phénomène de réveil ou de sommeil, Dutrochet a enlevé toute la partie membraneuse des folioles, en laissant seulement subsister une portion de leur nervure médiane, et les mouvements continuèrent d'avoir lieu.

Avec la sensitive il observa que dans le vide la plante resta éveillée; les feuilles du *robinia pseudo acasia* ayant été mises dans de l'eau aérée, les alternatives de sommeil et de réveil eurent lieu comme dans l'air, mais avec cette différence que le réveil fut incomplet et moins marqué que dans les conditions normales. D'après les mêmes principes que

(1) *Philosoph. transact.* (1836). — *Bibliothèque univ. de Genève*, nouvelle série, t. 1, p. 388 (1836).

(2) *Mémoires* déjà cités, t. 1er, p. 497.

pour la flexion vers la lumière, Dutrochet pensa que ces effets tenaient aux actions diverses exercées sur le tissu cellulaire et sur le tissu ligneux : la turgescence du tissu cellulaire dans le pétiole, qui produit le réveil, serait donc liée aux effets de la respiration qui ne commence à s'exercer qu'au moment de l'action de la lumière; le soir, quand les phénomènes d'assimilation chimique diminuent, ce même tissu perdant une partie de sa turgescence, l'incurvation due au tissu fibreux l'emporterait ; de là le sommeil.

M. Ratchinski, dans les recherches citées précédemment page 251, s'est occupé également de cette question, et a opéré sur différentes plantes telles que les *chenopodium album*, *malva rotundifolia*, *impatiens glanduligera*, *lupinus*, *oxalis*, etc. ; il a donné à peu près la même explication que Dutrochet.

M. Hoffmann, dont on a cité, page 256, les recherches sur le sommeil des fleurs, a observé les effets produits sur les feuilles placées dans des conditions semblables, et est arrivé aux mêmes conséquences, c'est-à-dire que les rayons les plus réfrangibles paraissent activer le sommeil et les moins réfrangibles prolonger l'éveil et retarder le sommeil ; mais ces expériences sont à reprendre avec des rayons d'une réfrangibilité bien déterminée, car ce phénomène, si ces conclusions sont exactes, paraîtrait tenir à la même cause que la flexion des tiges vers les sources lumineuses. M. Hoffmann a également vérifié que les mouvements dont il est question ici peuvent s'exécuter avec les plantes immergées comme lorsqu'elles restent dans l'air.

En terminant ce sujet on doit dire que le sommeil des feuilles n'a aucun rapport nécessaire avec celui des fleurs ; ainsi par exemple les fleurs d'un acacia voisin du latisiliqua s'ouvrent la nuit et se ferment le jour, tandis que les feuilles du même arbre se relèvent le jour et prennent la nuit la position du sommeil; l'épanouissement des feuilles pour cette plante est donc diurne, et celle des fleurs nocturne (1).

On voit en définitive que les mouvements des feuilles, comme ceux des corolles de certaines fleurs, sont influencés par la lumière, mais dans l'état actuel de la science, de même que pour la flexion des tiges, on ne saurait en donner d'explication complétement satisfaisante.

Enroulement. — Les mouvements dont il va être question paraissent moins directement liés à l'action lumineuse que les précédents; cepen-

(1) De Candolle, *Physiologie végétale*, t. 2, p. 862.

dant l'influence de cet agent est encore manifeste. On a vu plus haut, page 247, que Knight avait observé que les vrilles de la vigne vierge et du pois cultivé avaient une tendance à fuir la lumière, et que dès lors elles devaient se porter vers les corps opaques qui les avoisinaient et s'enrouler autour de ces corps. Ainsi Knight en présentant à ces vrilles un miroir qui leur renvoyait une vive lumière les déterminait à s'en éloigner. Si ce phénomène était général, on pourrait en inférer la cause de l'enroulement des tiges volubles ou volubiles, c'est-à-dire des tiges qui s'enroulent autour des obstacles comme les haricots, les pois, etc.; mais il n'en est pas ainsi, comme on va le voir.

M. Palm (1), qui un des premiers s'est occupé des plantes volubiles, en compte environ 600, qui se rangent en 34 familles différentes. Les tiges de ces plantes s'enroulent pour la plupart en tournant autour de leur support de gauche à droite; les autres suivent une direction contraire; dans l'un et l'autre cas le sens de l'enroulement est invariablement déterminé dans chaque espèce. Cependant, plusieurs plantes font exception, et donnent des tiges volubiles qui tournent indifféremment dans les deux sens; on peut citer comme exemple la douce-amère (*solanum dulcamara*), les loasa et *muehlenbeckia varians;* la bryone (*bryonia dioica*) offre ce phénomène qu'elle tourne en deux sens opposés à la base et au sommet, et change de direction au milieu de sa longueur. M. Palm, d'après l'observation des faits, a pu conclure que bien que certaines causes extérieures favorisent le phénomène de l'enroulement, cependant la lumière a une influence déterminante. A la même époque M. Mohl (2), en expérimentant sur le liseron des fenêtres (*ipomœa purpurea*) et sur le haricot, a vu la tige de ces plantes s'enrouler autour des corps dans l'obscurité comme à la lumière, et a été conduit à une conclusion opposée à la précédente.

Dutrochet (3) chercha à expliquer le phénomène de l'enroulement des plantes volubiles par un mouvement spontané et révolutif de l'extrémité de leurs tiges; comme la lumière, dit-il, les porte à fuir du côté le moins éclairé, elles se dirigent vers les supports ou vers les corps voisins, et le mouvement spontané révolutif dont est doué leur extrémité, combiné avec

(1) *Ueber das Winden*, etc.; Tubingue (1827). — De Candolle, *Physiologie végétale*, t. 2, p. 837 (1832).

(2) *Ueber den Bau und das Winden*, etc.; Tubingen (1827).

(3) *Comptes rendus de l'Académ. des sciences*, t. 17, p. 989 (1843); t. 19, p. 295 (1844).

celui par lequel elles fuient la lumière, les dirige en sens divers dans l'air où elles semblent chercher les corps solides autour desquels elles s'enroulent. L'explication de ce phénomène paraît du reste fort complexe, et l'existence de ce mouvement spontané et révolutif n'est pas complétement démontré; cependant, en dehors de toute hypothèse et avant même de chercher à rendre compte des différentes phases de l'enroulement, il faut examiner si la lumière exerce une influence déterminante et quelle est la limite de cette influence.

M. Ch. Darwin (1) a conclu de ses recherches que la lumière exerce une action sur le phénomène, car si l'on place des plantes volubiles dans une chambre, près d'une fenêtre, l'extrémité de leur tige, qui s'accroît lors de son mouvement révolutif qui la fait tourner autour de son support, met plus de temps pour décrire la demi-révolution pendant laquelle elle regarde le fond peu éclairé de la chambre que pour accomplir celle qui la maintient près de la fenêtre. Ainsi un *ipomœa jucunda* ayant fait en cinq heures vingt minutes un tour entier, le demi-cercle du côté de la fenêtre n'a pas exigé tout à fait une heure, tandis que l'autre n'a été parcouru que dans l'espace de quatre heures trente minutes.

M. Léon (2) a placé des plantes volubiles près de supports en verre, c'est-à-dire formés de matière transparente, ou bien composés d'un simple fil, et il a vu l'enroulement s'opérer; ce résultat ne montre pas que la lumière n'est pas nécessaire à la production du phénomène, seulement il indique que l'hypothèse de Knight ne saurait seule rendre compte des effets. Quant à la cause de l'enroulement, il l'attribue, comme Dutrochet, à des mouvements dus à un antagonisme entre la turgescence du tissu cellulaire et l'action par oxygénation du tissu fibreux, c'est-à-dire aux deux genres de réactions qui suivant Dutrochet sont également la cause des mouvements d'incurvation et de flexion des axes des plantes vers la lumière.

M. Duchartre (3) a fait varier les conditions d'éclairement de plusieurs plantes volubiles, et a montré le motif des divergences des conclusions opposées de MM. Palm et Mohl. Il a opéré d'abord avec l'igname de Chine (*diascorea Batatas*), plante qui peut végéter pendant longtemps à l'obscurité sans en souffrir notablement. Lorsque des pieds plantés en pots ont été en pleine végétation, il a placé les uns

(1) *Journal of the linnean Society*, t. 9, p. 1 (1865).
(2) *Bulletin de la Société de botanique de France*, t. 5, p. 351, 610, 624 679 (1858).
(3) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 61, p. 1142 (1865).

au milieu d'un jardin, les autres dans une cave entièrement obscure; en outre, il a pu faire passer successivement plusieurs pieds de l'obscurité à la lumière du jour. Dans tous les cas, les tiges d'igname ont perdu à l'obscurité la faculté de s'enrouler autour des baguettes servant de tuteurs et auxquelles il avait eu la précaution de les attacher afin de voir si, conformément aux idées contraires à l'influence lumineuse, l'irritation produite par le contact du corps étranger les déterminerait à s'enrouler; mais ce résultat n'a pas été observé, et dans l'obscurité elles sont restées non adhérentes aux tuteurs. En faisant passer les plantes à la lumière elles ont présenté une portion enroulée dans la partie de la plante qui s'était accrue pendant l'exposition au jour, mais en les rentrant dans l'obscurité elles ont poussé des tiges droites privées d'enroulement. Ainsi la lumière du jour est nécessaire à l'enroulement de cette plante.

Un pied de *mandevillea suavolens* dont l'extrémité a été placée dans un cylindre opaque en zinc a donné des pousses qui ont perdu la faculté de s'enrouler, tandis que sous l'influence de la lumière les nouvelles tiges ont présenté ce phénomène comme dans les conditions ordinaires.

On a dit plus haut que M. Mohl avait observé que l'*ipomæa purpurea* et le haricot présentaient le phénomène de l'enroulement dans l'obscurité; M. Duchartre en opérant avec un pied de la première plante a vu la tige placée dans un tuyau obscur, ou bien la plante étant dans une cave privée de lumière, s'enrouler aussi bien à l'obscurité qu'à la lumière.

Ces résultats intéressants montrent que parmi les plantes volubiles, les unes ne doivent leur enroulement qu'à la lumière, tandis que les autres ne paraissent pas éprouver d'influence; il serait intéressant de rechercher quels sont les éléments différemment réfrangibles qui exercent une action sur les premières plantes.

On doit rapprocher de ces effets l'enroulement des parties de certaines plantes que l'on a nommées des vrilles.

§ 4. *Aspiration, transpiration.*

La nutrition des plantes est un des phénomènes les plus importants de la vie végétale, et ne peut s'exercer sans l'influence de la lumière. Quelques plantes, il est vrai, croissent dans l'obscurité, mais elles sont

languissantes, étiolées, et, à l'exception peut-être de quelques criptogames, ne peuvent parcourir ainsi toutes les phases de leur existence.

Bien que les réactions nombreuses qui ont lieu dans les tissus végétaux ne soient pas connues, les observations des expérimentateurs ont montré quels sont les éléments nécessaires à ces réactions ainsi que les produits qui en résultent, et comment l'atmosphère est modifiée par la présence des plantes qui y végètent.

Un des corps les plus essentiels est l'eau, qui s'infiltre dans les tissus, est aspirée par les racines, dissout et transporte les diverses substances, et dont les éléments peuvent être assimilés aux végétaux dans l'acte de la nutrition.

La force d'absorption que présentent les plantes est surtout influencée par la chaleur et par la lumière; sans un certain degré de température elle ne se produit pas, en l'absence de la lumière elle cesse d'avoir lieu. Les observateurs qui se sont occupés de ce sujet ont remarqué que les branches ou les plantes enracinées et chargées de feuilles, plongées par leurs parties inférieures dans l'eau, pompent beaucoup plus d'eau le jour que la nuit. Si l'on place dans ces conditions plusieurs plantes aussi semblables que possible, l'une à l'obscurité, l'autre à la lumière diffuse ou artificielle, une autre à la lumière solaire, on voit ces dernières plantes aspirer beaucoup plus d'eau que la première et d'autant plus que la lumière est plus vive, sans que cependant la succion soit nulle à l'obscurité (1).

Cette eau est exhalée en partie dans l'atmosphère et la lumière est une des causes qui agit avec le plus d'intensité pour produire ce phénomène. Hales, Guettard, Senebier ont observé que lorsqu'une plante est placée à l'obscurité totale, elle cesse de transpirer quoiqu'elle continue encore pendant quelque temps à absorber de l'eau, de sorte que son poids augmente un peu. Les lumières artificielles produisent le même effet que la lumière solaire, à l'intensité près bien entendu. On sait aussi que les feuilles et les fleurs se conservent plus longtemps fraîches dans l'obscurité qu'exposées à la lumière.

Il résulte de là que les plantes tenues à l'obscurité reçoivent de l'eau sans la verser dans l'atmosphère; cette eau n'étant pas fixée dans les tissus, elles tendent donc peu à peu à se trouver dans un état d'hydro-

(1) Hales, *statique des végétaux*, traduct. française, par Buffon (1735). — Guettard, *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. 66 et 67 (1748 et 1749). — De Candolle, *Physiologie végétale*, t. 1, p. 81 et suiv.

pisie qui annonce la faiblesse des tissus et peut amener la chute des feuilles d'après les tiges. Les plantes qui reçoivent une trop faible lumière éprouvent des effets semblables, et en absorbant trop d'eau elles présentent des organes moins résistants que celles qui sont exposées au soleil, de sorte que les cellules et les fibres s'allongent sans prendre une consistance comparable à celle reçue dans des conditions convenables d'éclairement. Une vive lumière au contraire a pour effet de resserrer les tissus et de leur donner plus de densité et de solidité; la différence due à cette cause peut s'observer chez les individus de même espèce cultivés dans des climats différents, à des altitudes diverses, ou plus ou moins abrités.

De Candolle (1) distingue la transpiration insensible de l'exhalaison ou émanation aqueuse proprement dite; la première est cet effet lent qui tend à priver d'eau peu à peu toutes les parties cellulaires des végétaux, et qui s'exécute au travers de leurs tissus, sans pores apparents; elle est manifeste par la perte de poids des fruits charnus tels que les pommes, les raisins, ou par celle des tubercules; la seconde s'exerce par les organes revêtus de cuticule plus ou moins munie de stomates. Cette exhalaison est accompagnée de transpiration insensible, mais qui étant très-faible par rapport à elle peut être négligée. Il admet donc que, toutes choses étant égales d'ailleurs, l'émanation aqueuse de chaque partie est en raison du nombre des stomates; d'après cela les surfaces des feuilles qui en sont pourvues exhalent plus d'eau que celles qui en sont dépourvues, et les racines et les graines ne sont soumises qu'à la transpiration insensible.

Cependant les relations qui existent entre la quantité d'eau transpirée et le nombre des stomates ne sont pas nettement déterminées et la nature de l'épiderme influe beaucoup sur ce phénomène ; en effet, les feuilles résistantes de divers arbres et arbustes portent un très-grand nombre de stomates et transpirent peu, tandis que les herbes transpirent beaucoup et ont un moins grand nombre de stomates.

Si l'on connaît les conditions les plus générales qui déterminent l'absorption de l'eau et la transpiration des plantes sous l'action de la lumière, on n'a pas étudié l'influence des rayons différemment réfrangibles d'une manière aussi précise que pour la flexion des tiges et la décomposition de l'acide carbonique. On peut citer cependant les ex-

(1) *Physiologie vég.*, t. 1, p. 108.

périences faites par M. Daubeny (1) d'après lesquelles la puissance d'exhalaison et d'absorption de l'humidité est particulièrement influencée par les rayons les plus lumineux, c'est-à-dire par les rayons orangés, jaunes et verts, sous l'influence desquels, comme on le verra plus loin, les phénomènes de respiration sont également les plus actifs.

On doit dire encore, en terminant ce sujet, que la vapeur d'eau qui existe dans l'atmosphère ne paraît pas absorbée par les plantes pour s'en nourrir, ainsi que cela résulte des expériences de M. Duchartre (2), et que celle qui arrive dans le végétal peut provenir de l'eau qui mouille les feuilles mais résulte pour la presque totalité de celle qui est amenée par le mouvement circulatoire de la séve (3).

§ 5. *Respiration, fixation du carbone dans les végétaux.*

On attribue généralement à Ray (4) l'observation de ce fait que la lumière seule influe sur la couleur verte des plantes. Il a vu en effet que les plantes ne verdissaient pas quand elles végétaient sous un vase opaque et que leurs tiges alors s'allongeaient beaucoup; il s'était assuré que ce phénomène n'était dû ni à la privation de l'air ni à l'influence de la chaleur.

Bonnet, vers le milieu du siècle dernier, a beaucoup étendu ces observations; il les a variées, et a montré que sans l'action de la lumière les plantes étaient étiolées. Il fit des recherches intéressantes sur l'usage des feuilles (5), et observa le premier que placées sous l'eau elles se couvraient de bulles gazeuses, surtout à leur partie inférieure, quand on les exposait au soleil; lorsqu'elles cessaient d'être éclairées directement par les rayons solaires, les bulles cessaient de se montrer. Il pensait que ce gaz provenait de l'air interposé dans les plantes, et que la chaleur faisait dégager; il observa cependant que l'eau bouillie ne donnait pas de bulles gazeuses. Bonnet ne reconnut pas la cause de ces effets; cependant il venait de découvrir un fait constatant l'influence que la lu-

(1) *Transact. philosoph.*, t. 126, part. 1 (1836). — *Bibliothèque univ. de Genève*, nouvelle série, t. 1, p. 388.

(2 *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 42, p. 428 et 790.

(3) Voir aussi pour la transpiration et l'exhalaison aqueuse, J. Sachs, *Handbuch der physiologischen botanik*, p. 228. — W. Schumacher, *Die physik in ihrer anwendung auf agricultur, etc.;* Berlin (1867).

(4) *Historia gener. plantarum*, t. 1er, livr. 1 (1686).

(5) *Recherches sur l'usage des feuilles*, page 24 et suiv. (1754).

mière exerce sur la vie végétale, et qui a été le point de départ des recherches importantes sur la nutrition des plantes faites à la fin du siècle dernier.

Une vingtaine d'années après, Priestley (1) annonça que la végétation d'une plante à la lumière devient plus vigoureuse dans un air vicié par la respiration d'un animal ou par la combustion d'une bougie, et qu'elle lui rend de nouveau sa pureté primitive et sa faculté d'entretenir la flamme. Il montra donc que les plantes émettaient du gaz oxygène sous l'influence des rayons lumineux. Cette observation révélait une des grandes lois de la nature; aussi fut-elle accueillie avec enthousiasme, malgré que Priestley n'eût point remonté à la cause du phénomène.

Ingenhouz (2) fit de nombreuses expériences, montra que cette action des plantes n'appartenait qu'aux parties vertes, et qu'elle ne s'exerçait que sous l'influence de la lumière solaire. A peu près à la même époque, Senebier (3) prouva que les feuilles et les parties vertes absorbaient du gaz acide carbonique de l'atmosphère et éliminaient du gaz oxygène, et que c'était par cette action qu'avait lieu l'épuration de l'air vicié par les animaux. Il observa en outre que des feuilles exposées au soleil, dans de l'eau ordinaire ou de l'eau légèrement imprégnée d'acide carbonique, produisaient du gaz oxygène aussi longtemps qu'il restait du gaz acide carbonique dans l'eau. Il vit que lorsque ce gaz était épuisé et que l'on plaçait les feuilles dans de l'eau distillée, elles ne produisaient pas une quantité d'air plus grande que celle qui pouvait être interposée dans leur propre volume.

On voit que la nature du phénomène était mise en évidence, mais il restait à déterminer le rapport entre le volume du gaz acide carbonique absorbé et celui de l'oxygène exhalé. Ce sujet fut étudié avec le plus grand soin par Th. de Saussure (4), qui montra que dans ses expériences le volume de l'oxygène dégagé demeurait inférieur à celui de l'acide carbonique absorbé, mais qu'en même temps une portion de l'oxygène retenu par la plante était remplacée par de l'azote exhalé; il pensa que ce gaz azote provenait de la substance même de la plante, et fut conduit à cette conclusion, que l'oxygène dégagé provenait de l'acide carbo-

(1) *Phylosoph. transat* (1772). — *Priestley's Experim* etc., 2e édit. (1775).

(2) *Expériences sur les végétaux;* Paris (1780).

(3) *Mémoires physico-chimiques sur l'influence de la lumière;* Genève, 1782. — *Expériences sur l'action de la lumière solaire dans la végétation;* Genève, 1788.

(4) *Recherches chimiques sur la végétation.* Paris (1804).

nique absorbé. Ainsi ce grand fait physiologique de l'influence de la lumière dans la nutrition des plantes était définitivement établi.

Ces expériences ont été répétées et variées dans différentes conditions, comme on va le voir, et actuellement il est démontré que l'on observe seulement le résultat final de réactions fort complexes dans lesquelles il faut faire intervenir non-seulement le gaz acide carbonique et l'oxygène qui se trouvent dans l'atmosphère, mais encore l'eau ainsi que les matières transportées par le mouvement de la séve.

Il faut donc examiner quelles sont les parties du rayonnement lumineux qui sont nécessaires pour produire la coloration verte, c'est-à-dire pour donner lieu à l'émission de gaz oxygène sous l'influence de la lumière; ensuite, et successivement, quel est le rôle de l'acide carbonique, de l'oxygène, de l'azote, et quelles sont les quantités de ces gaz qui sont absorbées ou exhalées.

On vient devoir que la lumière est nécessaire à la vie végétale, et que les plantes qui germent et croissent à l'obscurité sont étiolées et présentent une couleur jaunâtre, qui ne prend le ton vert que sous l'action de la lumière. Cette coloration verte peut être également donnée par une lumière artificielle; ainsi Tessier (1) observa que des feuilles verdissent sous l'influence des lampes comme sous celle de la lumière de la lune, et De Candolle a remarqué la même action en colorant en vert des plantes par l'action prolongée des lampes qui lui servaient à étudier les mouvements des pétales et des feuilles lors de leur sommeil ou de leur réveil. M. H. Mangon (2), en se servant de la lumière électrique dont l'action est si vive, a pu également verdir de jeunes plants de seigle. Du reste, il n'y a que la composition et l'intensité qui diffèrent dans les diverses sources lumineuses, et les rayons de même longueur d'onde, quelle que soit leur origine, produisent les mêmes effets.

Senebier (3) a fait végéter des plantes telles que des chicorées, des épinards, des pois, sous des écrans colorés de différentes nuances, mais la composition de la lumière transmise n'a pas été déterminée, de sorte que l'on ne peut arriver à une conclusion certaine au moyen des résultats qu'il indique. Il en est de même à l'égard des expériences faites par Tessier en exposant des plantes derrière des carreaux de verre coloré.

(1) *Mémoires de l'Académie des sciences*, t. 102, p. 154 (1783).
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 53, p. 243 (1861).
(3) *Mémoires physico-chimiques, etc.*, t. 2, p. 55 (1782).

M. Daubeny (1), dans un travail dont il a déjà été question, a examiné l'influence des rayons qui ont traversé des écrans de verre coloré sur l'émission de gaz oxygène et la décomposition de l'acide carbonique par les plantes, mais sans déduire aucune conclusion générale de ses recherches.

M. Hunt, comme on l'a dit antérieurement, page 236, en examinant l'action des rayons qui avaient traversé des milieux colorés sur la germination et l'accroissement des jeunes plantes, avait observé que la lumière paraissait nuisible à la germination des graines et à l'accroissement des jeunes plantes. Dans un autre travail (2), il remarqua que des plantes croissant sous l'influence d'une lumière ayant traversé des milieux de couleur bleue ou rouge contenaient plus d'eau que celles qui avaient cru sous l'influence des rayons jaunes ou verts; la formation de la fibre ligneuse avait suivi une progression inverse, et était plus grande dans les plantes qui avaient végété sous les rayons jaunes et verts. Il a cité les résultats suivants comme indiquant la proportion de fibre ligneuse formée dans une même espèce de plantes pendant le même temps :

Dans la lumière	bleue	les plantes étaient composées de	7,16	pour 100 de fibre ligneuse.
—	rouge	—	7,25	—
—	vert	—	7,60	—
—	jaune	—	7,69	—

Ainsi les rayons les plus lumineux jaunes et verts étaient ceux qui avaient donné le maximum d'effet.

M. Hunt cite un fait qui semblerait en contradiction avec celui-ci : ayant exposé de jeunes plants bien vigoureux à l'influence des rayons du spectre, ils périrent en peu de temps sous l'action de la lumière jaune; leur mort fut lente à venir sous l'influence du vert, et ils ne prospérèrent que sous les rayons rouges et bleus. Mais il faudrait savoir si l'activité de la lumière jaune et verte n'était pas trop grande pour les jeunes plants, et en outre si les conditions de température et d'humidité étaient les mêmes partout; on ne saurait donc infirmer par ce fait les résultats précédents.

(1) *Philosophic. transal*, t. 126, 1836, 1[re] partie. — *Biblioth., univ. de Genève*, nouvelle série, t. 1[er], p. 388 (1836).
(2) *Biblioth. univ. de Genève*, 2[e] série, t. 53, p. 374.

M. Gardner (1) a opéré avec les rayons du spectre solaire ; il a semé différentes graines et principalement des graines de navet, et les a laissées se développer dans l'obscurité jusqu'à ce qu'elles eussent atteint de 5 à 7 centim. de longueur. En plaçant ces semis dans des boîtes exposées aux rayons différemment réfractés d'un spectre, il a pu juger des résultats obtenus.

Il a reconnu que la couleur verte donnée par les rayons aux petites plantes étiolées a été la plus prononcée dans la boîte exposée aux rayons jaunes. Dans ces expériences, l'espace de temps le plus court qui a suffi pour verdir un semis de navets a été, sous l'action des rayons jaunes, de deux heures; souvent il a fallu six heures et même davantage. On conçoit que ce temps dépend de l'intensité de la lumière incidente. La couleur verte ainsi obtenue est assez persistante; un séjour de soixante heures dans l'obscurité n'a pas suffi pour l'altérer.

M. Gardner a trouvé que dans une expérience il a fallu les temps suivants pour donner la même nuance de vert aux plantes renfermées dans différentes boîtes exposées aux rayons du spectre :

	Heures.
Rayons orangés.	4 ½
Rayons jaunes.	3 ½
Rayons verts.	6

Au bout de dix-sept heures et demie, le semis exposé aux rayons bleus avait atteint une nuance de vert beaucoup plus faible.

Ainsi la partie la plus lumineuse de l'image prismatique produit la coloration verte des plantes avec le plus d'intensité; c'est également sous l'influence de ces rayons, comme on va le voir, que se produit le plus grand dégagement de gaz oxygène.

Les expériences suivantes de M. Draper, faites avec le spectre, indiquent quelles sont les parties les plus actives de l'image prismatique pour opérer le dégagement de gaz oxygène des plantes (2). Ayant réuni des brins d'herbe, il les plongea pendant plusieurs jours à l'obscurité dans de l'eau chargée d'acide carbonique, afin d'en chasser tout l'air adhérant à leur surface. Il remplit ensuite avec de l'eau pure chargée d'acide car-

(1) *Philosoph. magasine*, janv. (1844). — *Biblioth. univ. de Genève..*, t. 49, p. 376.
(2) *Philosoph. magasine*, sept. (1844). — *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 11, p. 214.

bonique sept tubes de verre ayant chacun 13 millim. de diamètre et 18 centim. de longueur ; il les renversa sur une petite cuve pleine du même liquide, et il plaça dans la partie supérieure de chacun d'eux le même nombre de tiges d'herbes en ayant soin qu'elles fussent aussi semblables que possible les unes aux autres. Tous les tubes furent disposés verticalement et parallèlement l'un auprès de l'autre dans la cuve à eau.

Il plaça alors l'appareil de manière à ce qu'un spectre lumineux, rendu fixe par la réflexion d'un faisceau de rayons solaires sur un héliostat, tombât sur les parties des tubes qui contenaient les tiges, et de façon à ce que chacun d'entre eux occupât une étendue du spectre présentant une coloration bien déterminée. Au bout de quelques minutes, les tubes sur lesquels tombait la lumière orangée, jaune et verte, commencèrent à dégager de petites bulles de gaz, et au bout d'une heure et demie la quantité en fut assez considérable pour être mesurée. Voici les résultats des deux expériences faites de cette manière :

Couleur de la lumière incidente.	Volume du gaz. 1re expérience.	2e expérience.
Rouge foncé	0,33	»
Rouge et orangé	20,00	24,75
Jaune et vert	36,00	43,75
Vert et bleu	0,10	4,10
Bleu	»	1,00
Indigo	»	»
Violet	»	»

On voit que les rayons qui produisent la décomposition de l'acide carbonique sont les rayons compris entre le rouge et le bleu, et que le maximum d'action a lieu dans le jaune, c'est-à-dire là où se trouve le maximum de lumière dans le spectre lumineux ; les rayons rouges extrêmes ainsi que les rayons bleus et violets ne donnent pas lieu à cette réaction. Ces expériences viennent donc à l'appui de ce qui a été dit plus haut.

M. Draper a répété les mêmes expériences en se servant d'écrans colorés qui ne laissent passer que des rayons d'une réfrangibilité bien déterminée : ayant pris trois tubes disposés comme les précédents, ils les exposa simultanément à l'action de la lumière solaire, le premier

à la lumière libre, le deuxième sous un écran rempli d'une dissolution de bichromate de potasse qui ne laisse passer que le rouge, l'orangé et le jaune vert du spectre; le troisième sous un écran de sulfate de cuivre ammoniacal ne laissant passer que la partie la plus réfrangible de l'image, prismatique, depuis la raie F du bleu jusqu'au delà du violet. Il a obtenu pour les volumes de gaz dégagé les résultats suivants :

Lumière libre.	4,75
Écran de bichromate de potasse.	4,55
Écran de sulfate de cuivre ammoniacal. .	0,75

Les rayons actifs pour produire le dégagement d'oxygène dans les plantes sont donc loin d'avoir la réfrangibilité de ceux qui influencent les sels d'argent ou d'or, car ces dernières substances sont impressionnées au contraire dans le bleu et le violet, comme on la vu antérieurement, page 82 et suivantes.

M. Draper, qui a soumis les gaz dégagés à l'analyse, a vérifié que dans les différents tubes l'oxygène n'est pas pur, et se trouve mélangé d'une certaine quantité d'azote, qui est très-variable suivant les plantes, et peut aller jusqu'aux trois cinquième du volume total du gaz ; du reste on reviendra plus loin sur ce sujet.

On peut citer encore comme se rapportant à l'action des rayons différemment réfrangibles les expériences faites par MM. Cloëz et Gratiolet sur les plantes aquatiques submergées (1), lesquelles sous l'influence de la lumière dégagent une forte proportion d'oxygène sans qu'il y ait à l'obscurité émission d'acide carbonique. Ayant placé des tiges garnies de feuilles de *potamogeton perfoliatum* dans des flacons remplis d'eau contenant de l'acide carbonique, ils ont exposé ces flacons sous des cages de verre à l'action de la lumière solaire; ils ont fait usage d'une cage en verre blanc, d'une autre en verre blanc dépoli, et de cages en verre jaune, rouge, vert et bleu.

Les résultats des expériences ont permis de conclure que le gaz recueilli, qui est un mélange d'oxygène, d'azote et d'acide carbonique, a une composition variable, et qu'il est d'autant plus riche en oxygène que l'action lumineuse a été plus active. Ils montrent également que le maximum d'action a eu lieu sous le verre blanc dépoli; l'effet produit sous le verre jaune vient ensuite, puis celui qui a été observé sous le

(1) *Ann. de chimie de physique*, 3e série, t. 32, p. 41 (1851).

verre blanc transparent, celui produit sous le verre rouge, sous le verre vert, et en dernier lieu sous le verre bleu. Si l'on a égard à la réfrangibilité des rayons transmis au travers des verres colorés, on reconnaît que le phénomène présente la même marche que dans les expériences précédentes, et que les rayons les moins réfrangibles agissant le plus vivement, les rayons bleus et violets n'exercent que peu ou point d'influence.

M. Guillemin (1) a également examiné l'influence des différents rayons du spectre solaire sur la formation de la matière verte, et s'est placé dans des conditions telles qu'il avait une intensité assez grande des divers rayons. Il s'est proposé de rechercher si l'action qui a lieu avec le plus d'énergie dans l'orangé et le jaune se prolongeait au delà des rayons visibles soit du côté du rouge soit au delà du violet. Il a fait usage de prismes de quartz et de sel gemme, afin d'agir avec des prismes qui soient transparents pour les rayons de ces réfrangibilités, les premiers donnant l'ultra-violet et les seconds l'infra-rouge prismatique (voir pages 110 et 30).

Les plantes sur lesquelles il a opéré étaient des semis d'orge, dont les tigelles verdissent rapidement à la lumière quand leur germination a eu lieu dans l'obscurité. Dans ces expériences, au bout de six ou huit heures de l'action du spectre, les feuilles d'orge éclairées par les rayons ultra-violets ont présenté une teinte verte très-visible, mais moins intense que celle qui se développe sous l'influence des différents rayons colorés; les autres plantes ont indiqué un maximum d'action dans le jaune, comme on l'avait déjà reconnu antérieurement. Ainsi les rayons les plus réfrangibles de la lumière solaire ne sont pas dépourvus de la propriété de verdir les feuilles.

Il a observé des effets analogues dans le commencement de la partie infra-rouge du spectre : deux expériences faites au mois d'août, de huit heures du matin à cinq heures du soir, avec un prisme de sel gemme, ont montré qu'à partir du développement maximum de la matière verte dans le jaune et l'orangé l'action décroît rapidement dans le rouge extrême, dont elle dépasse les limites, et s'étend dans la région infra-rouge à une distance de la raie A égale à l'intervalle du rouge extrême au jaune.

M. Guillemin a conclu de ses expériences que si la matière verte se forme principalement sous l'influence des rayons les plus lumineux du

(1) *Ann. des sciences naturelles*, 4e série, partie botanique, t. 7, page 154.

spectre, cependant elle peut avoir lieu dans les parties de cette image qui n'impressionnent que peu ou point la rétine. Si même l'on prolongeait la courbe des intensités lumineuses (voir page 143) d'une part jusqu'aux derniers rayons de l'ultra-violet, d'autre part jusque dans l'infra-rouge près de la région où se trouve le maximum de chaleur, sans l'abaisser brusquement au delà du rouge et du violet, elle représenterait approximativement en chacun de ses points l'aptitude relative de chaque rayon à déterminer la production de la matière verte.

M. Guillemin a fait remarquer que les feuilles des végétaux étiolés verdissent plus promptement quand elles sont exposées à la lumière diffuse de l'atmosphère que lorsqu'elles sont frappées par les rayons solaires. Il a annoncé également que les rayons rouges, orangés, jaunes, verts et bleus, agissent plus rapidement que les rayons solaires directs; ainsi les rayons jaunes d'un spectre intense se sont montrés aussi actifs que la lumière diffusée par l'atmosphère correspondant à toute la moitié nord de la voûte céleste; dans ces rayons, il suffisait d'une demi-heure pour la production d'une teinte verte très-appréciable. Ces résultats demandent à être bien constatés, et il faudrait s'assurer si les feuilles et les tiges des végétaux qui reçoivent l'influence de la lumière ne se dessèchent pas inégalement pendant l'action des divers rayons; si les conditions hygroscopiques restaient les mêmes, ces effets indiqueraient peut-être des actions inverses produites dans quelques parties du spectre solaire, sans quoi on ne pourrait expliquer cette action moindre des rayons réunis que celle de chacun des rayons isolés.

Les résultats cités antérieurement ne sont pas en contradiction avec l'observation de la coloration verte des jeunes plantes dans l'ultra-violet et l'infra-rouge, car la position du maximum d'action est sensiblement la même dans ces diverses séries d'expériences, et se trouve dans l'orangé et le jaune prismatique, mais l'extension plus grande des effets dans les autres parties du spectre provient de l'intensité avec laquelle les rayons ont agi et de la durée de l'expérience; d'après ce que l'on sait sur les effets chimiques produits sous l'influence de la lumière, il est facile de concevoir que ces effets puissent s'étendre de chaque côté de la position du maximum de coloration.

En ce qui concerne le dégagement du gaz oxygène par les feuilles insolées quand elles sont placées sous l'eau contenant de l'acide carbonique, on peut se rendre compte du motif pour lequel, dans les expériences de M. Draper, il n'avait pas lieu dans les rayons autres que

les rayons les plus lumineux : comme ce dégagement ne se produit que sous l'action directe des rayons solaires et nullement sous celle de la lumière diffuse, bien que celle-ci influe sur la plante mais avec une énergie d'action insuffisante pour opérer le dégagement, il n'y a donc que les rayons les plus actifs du spectre lumineux qui puissent le présenter; mais comme la coloration des plantes a lieu sous l'action des rayons diffusés comme sous l'influence des rayons directs, elle peut se manifester dans des rayons du spectre où le dégagement de gaz n'est pas appréciable. Il en est de même des effets analogues observés au moyen des écrans colorés.

M. J. Sachs (1) a fait germer et végéter des plantes sous l'influence d'écrans colorés formés par des cylindres concentriques entre les surfaces desquels se trouvaient des liquides colorés; ces liquides étaient du bichromate de potasse et du sulfate de cuivre ammoniacal, qui donnent, le premier les rayons rouges, orangés et jaunes, et le second les rayons bleus, violets et ultra-violets. Il avait pour but d'examiner comment se développent les plantes quand elles végètent étant ainsi éclairées par ces écrans.

Il a reconnu qu'après la sortie des germes de la terre le développement se fait toujours plus rapidement et mieux à la lumière orangée qu'à la lumière bleue, et que sous l'influence de celle-ci les plantes exigent quatre à six jours de plus pour développer les cotylédons foliacés; elles restent aussi plus petites. Ainsi les graines germées du lin cultivé (*linum usitatissimum*) et de la moutarde blanche (*sinapis alba*) donnent des tigelles qui deviennent sous l'influence de la lumière orangée deux fois plus grandes qu'à la lumière bleue, mais sans atteindre le développement acquis à la lumière extérieure. A la lumière bleue le développement s'arrête quand les jeunes plantes ont consumé la matière contenue dans la graine, et comme cela aurait eu lieu dans l'obscurité. Sous la lumière orangée, au contraire, il se forme plusieurs petites feuilles. D'après ces résultats, les plantes végétant sous la lumière bleue et violette sont donc étiolées.

Si l'on veut comparer entre eux les différents résultats dont il vient d'être question, on peut remarquer que s'ils s'accordent pour indiquer quels sont les rayons les plus efficaces ; cependant quelques-uns semblent contradictoires, et surtout ceux qui sont obtenus au moyen

(1) Botanische Zeitung (1864), p. 353, 362, 369.

des écrans colorés ; il peut se faire que cela tienne aux conditions dans lesquelles se sont placés les opérateurs, et qui sont loin d'être les mêmes : s'il s'agit de la coloration en vert des végétaux, l'action paraît devoir s'étendre à presque tous les rayons du spectre, mais à des degrés très-différents; s'il s'agit de la décomposition de l'acide carbonique et du dégagement de l'oxygène par les feuilles plongées sous l'eau, comme on l'a dit plus haut, les rayons rouges, orangés, jaunes et verts paraissent agir presque seuls; mais si l'on examine quel peut être le développement des plantes pendant un certain temps, il peut se faire qu'une certaine intensité lumineuse soit nécessaire, et que dès lors des rayons qui agissent très-faiblement pour produire ces réactions n'aient pas une intensité suffisante pour que la nutrition des plantes puisse s'opérer; le développement de celles-ci doit donc avoir lieu comme sous l'influence d'une lumière diffuse très-faible, c'est-à-dire presque comme à l'obscurité.

On doit également remarquer que sous les écrans colorés exposés au soleil ou à la lumière diffuse l'intensité des rayons est loin d'être la même, et que les effets ne sont pas comparables à ceux qui sont observés dans les parties du spectre de même nuance ; d'un autre côté, des rayons infra-rouges et ultra-violets peuvent être transmis, de sorte que les plantes ont pu se trouver dans des conditions diverses de température et d'humidité, qui ont pu exercer une influence presque aussi grande sur les résultats observés que les différences d'intensité des rayons actifs.

Je citerai encore les résultats observés par M. Cailletet (1) en raison d'une différence dans les effets produits avec les écrans colorés en vert : ayant mesuré la quantité d'acide carbonique absorbée par des feuilles exposées à l'influence des rayons solaires dans des mélanges d'acide carbonique et d'air, sous des cloches en verre coloré, il a observé des résultats analogues avec les verres blancs, jaunes, rouges, bleus et violets ; il y a eu absorption plus ou moins grande d'acide carbonique et émission d'oxygène ; l'action, vive sous les verres blancs et jaunes, a été plus faible sous le verre rouge et nulle sous les verres bleus et violets. Mais il a remarqué que sous la cloche en verre vert dont il s'est servi non-seulement l'acide carbonique n'a pas été décomposé, mais il y a eu émission d'une légère quantité de ce gaz comme si la plante eût été dans l'obscurité; il a annoncé, d'après cela, que la lumière

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* t. 65, p. 322 (1867).

verte aurait la propriété de produire rapidement l'étiolement de la plante.

Ces résultats étant opposés à ceux qui ont été observés au moyen de la coloration verte des végétaux, et par l'émission de l'oxygène sous l'eau, ainsi qu'à ceux dont je vais parler, il faudrait bien connaître toutes les conditions diverses dans lesquelles l'auteur s'est placé et quelle est la cause de cette production d'acide carbonique qui est venu se mélanger aux gaz ambiants; puis il faudrait aussi connaître quelle est le dégré de transparence des écrans verts dont il a fait usage. On doit remarquer que la chlorophylle étant verte par transparence, elle absorbe une partie des rayons de couleur complémentaire, c'est-à-dire principalement les rayons orangés et rouges, et que ce sont les rayons absorbés qui dans les plantes doivent agir pour opérer la décomposition de l'acide carbonique; mais une partie des rayons traversent encore une épaisseur déterminée de cette substance, et dès lors doivent conserver une activité chimique en rapport avec leur intensité, car l'intensité et la réfrangibilité déterminent seules les réactions qu'un faisceau de lumière peut produire. Il n'y aurait donc que dans le cas d'une opacité absolue, où l'on aurait une absorption totale de la lumière incidente, et où aucune action ne serait transmise.

J'ai pensé à me servir comme écran d'une dissolution alcoolique de chlorophylle, et à agir sur des plantes avec les rayons qui avaient traversé une épaisseur déterminée de cette matière (1).

Examinons d'abord comment la chlorophylle absorbe les rayons solaires : quand on place un écran plein d'une dissolution de chlorophylle sur la route d'un faisceau de rayons lumineux avant sa réfraction dans un prisme, et qu'on examine le spectre formé, si la teinte de l'écran est claire, on distingue plusieurs bandes noires qui traversent l'image prismatique et qui indiquent un pouvoir d'absorption inégal de cette matière sur les différents rayons réfrangibles. Toute la partie bleue, violette et ultra-violette au delà de F est arrêtée, et l'on sait, comme on l'a vu dans le Ier volume, page 319, que dans ces rayons elle donne lieu à un effet de phosphorescence très-curieux. Parmi ces bandes, l'une, située

(1) On forme aisément une dissolution de chlorophylle en faisant bouillir plusieurs fois dans l'eau des feuilles qui contiennent beaucoup de matière verte; les épinards sont dans ce cas. On rejette l'eau, et quand on a enlevé les matières solubles on exprime le résidu, et après l'avoir desséché suffisamment, on le traite par l'alcool, et on filtre la dissolution. On peut avoir ainsi cette dissolution plus ou moins concentrée.

de B à C, dans l'orangé rouge, est très-foncée, et il est remarquable de voir que ces rayons orangés qui sont fortement absorbés sont ceux qui paraissent les plus efficaces pour opérer la fixation du carbone ; plusieurs autres sont comprises entre C et F. Entre A et B on remarque un espace rouge très-vif, indiquant que les rayons de cette réfrangibilité traversent l'écran de chlorophylle sans absorption bien notable. Un écran plus foncé de cette substance augmente l'épaisseur des bandes et diminue l'intensité du spectre comprise entre B et F, et quand l'épaisseur de la couche de dissolution de chlorophylle est suffisante, l'écran paraît rouge, ne transmettant plus que la partie extrême la moins réfrangible du spectre lumineux (1).

Il serait intéressant de rechercher si dans le spectre solaire il y a des effets de coloration des plantes ou d'émission d'oxygène plus grande dans certaines régions que dans les parties voisines, c'est-à-dire si pour ces effets physiologiques on observe des maxima et des minima d'action comme lors de certaines réactions chimiques telles que celles exercées sur les sels de cuivre (page 96) et sur les sels de fer; dans ce cas, il faudrait examiner si ces espaces auraient des rapports avec les positions des bandes que la chlorophylle peut produire. Cela n'est pas impossible, et jusqu'ici on n'a pu observer si l'action du spectre diminuait graduellement d'intensité à partir du maximum, car on s'est servi de plantes qui recevaient des faisceaux refractés trop larges, au lieu de spectres qui seraient produits par des faisceaux lumineux suffisamment étroits.



Fig. 60.

Afin d'utiliser l'action de la chlorophylle comme écran, j'ai fait usage de cloches représentées fig. 60, qui permettent de soumettre des plantes à l'influence de rayons d'une réfrangibilité déterminée. A B est un grand flacon dont le fond se relève en forme de cloche C D, de façon à constituer un appareil à double fond, les parois intérieures et extérieures étant partout à peu près à la même distance. La

(1) Voir également *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 38, p. 498.

partie supérieure A est munie d'une fermeture à l'émeri, et comme c'est la seule ouverture du vase, en versant dans l'intérieur un liquide coloré, ce liquide agit comme écran et tamise la lumière qui pénètre dans la cloche; on peut donc placer en P des plantes ou des appareils destinés à être soumis à l'influence des rayons lumineux. Cette cloche repose sur une base en bois MN portant une rainure dans laquelle entre la circonférence de la base, afin d'éviter le passage de la lumière entre le support et cette base. Les cloches dont j'ai fait usage avaient à l'intérieur 12 à 18 centimètres de diamètre et de 25 à 35 centimètres de hauteur de C en D ; l'épaisseur entre D et B était de 3 centimètres.

J'ai employé comme liquides une dissolution saturée de bichromate de potasse, du sulfate de cuivre ammoniacal et une dissolution de chlorophylle ; cette dernière était assez concentrée pour paraître verte sombre, et sous l'épaisseur de 3 centimètres représentait assez bien la nuance du vert foncé à bouteille ordinaire ; sous une épaisseur de 12 centim., elle semblait rouge. On pourrait aisément se servir d'autres liquides.

J'ai fait végéter dans des pots à l'obscurité des graines de navet hâtif et d'orge ; quand les tigelles de navet ont eu 5 centimètres de hauteur, et l'orge de 5 à 10 centimètres, ces plantes ont été mises en expérience en les plaçant sous des cloches semblables, mais remplies de liquides différents, à la lumière diffuse, puis un autre jour à la lumière solaire. A la lumière diffuse, sous la cloche verte de chlorophylle, les folioles des semis de navet après six heures d'action avaient une teinte verte bien déterminée ; après seize heures, c'est-à-dire après deux jours d'action de huit heures chaque, les folioles étaient tout à fait vertes. Cette action a paru presque aussi marquée que sous la cloche jaune orangé ; sous la cloche bleue, elle était moins vive. Au soleil, en trois heures les semis avaient verdi d'une manière bien manifeste, et après six heures la coloration était presque semblable à celle des tigelles des mêmes plantes qui avaient végété pendant le même temps à la lumière du jour. L'orge s'est comportée de la même manière que les tigelles de navet ; mais pour étudier l'apparition de la matière verte les semis de navet sont préférables, car les folioles des plants venues à l'obscurité sont jaunes sans traces de vert, tandis que les jeunes tiges d'orge étiolées sont d'un jaune un peu verdâtre.

On a placé deux feuilles de lierre dans de l'eau aérée renfermée dans une éprouvette, et cette éprouvette renversée dans une petite

cuve à eau a été placée sous la cloche colorée en vert par la dissolution de chlorophylle. Après six heures de l'action solaire, il y a eu environ 2 centimètres cubes de gaz réuni au haut de l'éprouvette. Les effets observés dépendent bien entendu du degré de transparence de l'écran, et s'il était plus foncé les résultats seraient différents. On pourrait aisément se servir de ces cloches pour étudier les différentes réactions opérées par la lumière sur les plantes, car la base MN peut permettre l'introduction de tubes qui serviraient à la circulation des gaz dans l'intérieur des appareils.

Ainsi les résultats obtenus avec l'écran vert formé par la dissolution alcoolique de chlorophylle, comme avec les écrans de verre vert des observateurs dont on a cité plus haut les recherches, et contrairement à l'observation de M. Cailletet, conduisent à la même conclusion, et l'on doit considérer les rayons de la partie orangée jaune et verte du spectre comme agissant plus ou moins vivement pour produire la coloration verte des plantes et pour décomposer l'acide carbonique suivant le degré de transparence des écrans dont on fait usage.

On voit, en résumé, que la partie du rayonnement qui donne lieu au dégagement d'oxygène et à la coloration verte des végétaux est principalement la partie la moins réfrangible du rayonnement solaire, c'est-à-dire celle qui est formée par les rayons les plus lumineux, orangés, jaunes et verts, quoique tous les rayons la déterminent, tandis que celle qui infléchit les tiges végétales est surtout la partie la plus réfrangible, bien que ce phénomène physiologique soit également produit, mais à un faible degré, par l'extrémité la moins réfrangible du spectre.

On a dit précédemment que les parties vertes des végétaux étaient celles qui sous l'influence de la lumière donnaient lieu au dégagement de gaz oxygène. Il ne paraît pas que dans cette action les stomates qui existent à leur surface y jouent un rôle nécessaire. De Candolle (1) a fait observer que le gaz oxygène s'échappe des feuilles mises sous l'eau au soleil, aussi bien par celles de leurs surfaces qui n'ont point de stomates que par celles qui en ont; et, d'un autre côté, les fruits verts et charnus, qui n'ont point de stomates, dégagent du gaz oxygène comme ceux qui en ont. M. Duchartre (2), qui a fait de nombreuses expériences avec des plantes de diverses espèces, a montré également qu'il n'y a aucune relation fixe entre le nombre et la grandeur des stomates et

(1) *Physiologie végétale*, t. 1er, p. 143.
(2) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 42, p. 37, et t. 63, p. 854.

les quantités de gaz dégagé au soleil; il pense qu'indépendamment des stomates on doit faire intervenir les cellules de l'épiderme des plantes dans l'accomplissement des phénomènes respiratoires.

L'on sait que le même côté d'une feuille est toujours tourné vers le ciel et, d'après ce motif, porte le nom de surface supérieure; suivant les observations de Bonnet citées antérieurement, page 239, si l'on dirige ce côté vers la terre la feuille ne tarde pas à se retourner. M. Boussingault (1) a étudié d'une manière comparative l'action produite à la lumière par les surfaces des feuilles sur un mélange d'air et d'acide carbonique. Il a caché avec du vernis ou du papier noirci un côté des feuilles et les a placées dans le mélange gazeux; en opérant simultanément sur deux feuilles introduites dans des éprouvettes différentes, puis en analysant les mélanges gazeux après l'action de la lumière, il a pu comparer l'action exercée sur chaque surface à celle qui s'exercerait si la feuille était libre de tout écran. Il a pu reconnaître que la surface supérieure avait toujours une action plus énergique que la surface inférieure; ainsi, dans une expérience, une feuille de laurier lui a donné le rapport de 4 à 1 pour exprimer les actions sur ces deux surfaces, et une feuille de peuplier blanc celui de 6 à 1. Mais ces effets sont variables avec l'épaisseur et la rigidité des feuilles, et la différence entre les effets produits sur les deux surfaces est moins prononcée quand les feuilles sont plus minces. MM. Cloëz et Gratiolet, dans les recherches mentionnées plus haut, ont reconnu également que dans les plantes qui végètent sous l'eau la partie supérieure des feuilles est le siége le plus actif des décompositions.

Sans entrer dans des détails physiologiques étendus, il est nécessaire d'indiquer quels sont les effets généraux observés quant aux proportions d'acide carbonique, d'oxygène et d'azote absorbées ou exhalées par les végétaux sous l'influence lumineuse.

Acide carbonique. — L'acide carbonique est absorbé et décomposé par les plantes (2) sous l'influence de la lumière, mais il semblerait résul-

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 63, p. 706 et 748. *Ann. de chimie et de phys.*, 4e série, t. 13, p. 868.

(2) M. Schultz (*Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 19, p. 524) avait avancé que l'oxygène émané des plantes ne provenait pas de la décomposition de l'acide carbonique, mais des acides végétaux, malique oxalique, etc., que les plantes pouvaient contenir; M. Boussingault (*Comptes rendus*, t. 19, p. 945) a montré qu'il n'en était rien, et que l'acide carbonique seul donnait lieu au dégagement d'oxygène des feuilles sous l'influence de la lumière.

ter des expériences de de Saussure que le mélange d'oxygène à ce gaz est nécessaire pour la respiration végétale. M. Boussingault (1) en plaçant des feuilles dans des atmosphères formées d'acide carbonique pur, ou mélangé d'air ou d'autre gaz, et en analysant les produits gazeux après un certain temps d'insolation, a trouvé que les feuilles exposées au soleil dans de l'acide carbonique pur, à la pression ordinaire de l'atmosphère, ne décomposent pas ce gaz, ou que du moins, si cela a lieu, c'est avec une extrême lenteur. Au contraire, elles le décomposent rapidement quand il est mélangé d'air; lorsqu'il contient de l'hydrogène ou de l'azote, sa décomposition paraît marcher aussi vite que dans ce dernier cas. Comme en diminuant la pression de l'acide carbonique pur, cette réaction est plus rapide que lorsque la pression est celle de l'air, M. Boussingault a émis l'opinion que les gaz mélangés à l'acide carbonique n'agissent qu'en diminuant la pression de ce dernier gaz et que le phénomène chimique de la respiration végétale conduit à un résultat analogue à celui que présente le phosphore, qui ne s'oxyde pas dans de l'oxygène pur à la pression ordinaire, mais qui se combine à ce dernier gaz quand celui-ci est mélangé d'un autre gaz ou que sa pression est moindre.

Si les parties vertes des végétaux absorbent et décomposent l'acide carbonique sous l'action de la lumière, elles émettent une certaine quantité de ce gaz à l'obscurité, et cela à peu près en proportion de l'oxygène absorbé ; le résultat final est le même que celui qui serait produit par une sorte de combustion. Mais la quantité d'acide carbonique émise alors est bien moindre que celle qui est fixée par les plantes. Ainsi, d'après les expériences faites par M. Boussingault (2) du mois de juin au mois d'août 1865, entre huit heures du matin et cinq heures du soir, dans des atmosphères riches en acide carbonique, 1 mètre carré de feuilles de laurier a donné en moyenne par jour :

			Litre.
à la lumière,	acide carbonique	absorbé.......	1,108
à l'obscurité,	id.	dégagé........	0,070

le rapport des deux quantités est à peu près celui de 16 à 1, c'est-à-dire qu'avec ces feuilles la décomposition de l'acide carbonique à la lumière a été seize fois plus vive en moyenne que l'émission de ce gaz à l'obscurité.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences,* t. 60, p. 872.
(2) *Ibid.*, t. 61, p. 606.

M. Corenwinder (1) a étudié cette émission d'acide carbonique par les plantes, et a reconnu qu'un certain nombre de végétaux donnent de l'acide carbonique non-seulement pendant la nuit, mais encore à l'ombre, c'est-à-dire à la lumière diffuse. Dans leur jeunesse, presque tous exhalent ainsi une petite quantité d'acide carbonique à la lumière diffuse ; le plus souvent dans l'âge adulte cette émission cesse ; cependant, d'après cet observateur, quelques-uns présenteraient cet effet dans toutes les phases de leur existence. La quantité d'acide carbonique décomposée le jour est tellement plus grande que celle qu'une même plante exhale la nuit, qu'il suffit souvent de trente minutes d'insolation pour faire regagner à celle-ci ce qu'elle a perdu pendant la nuit. Cette valeur est à peu près semblable à celle qui résulte de la détermination précédente.

Oxygène. — On a dit antérieurement que l'émission de gaz oxygène à la lumière avait été reconnue par Priestley et vérifié par tous les physiologistes qui se sont occupés de la respiration des plantes. De Saussure a prouvé qu'il y avait fixation d'oxygène en même temps que de carbone dans un végétal, car le volume de ce gaz émis était inférieur au volume d'acide carbonique absorbé.

D'après M. Boussingault (2), cette conclusion doit se rapporter à l'ensemble du végétal et non aux feuilles ou aux parties vertes, car les parties non colorées absorbent de l'oxygène et forment de l'acide carbonique, dont une portion peut être est émise pendant la nuit ; il a pensé qu'en analysant une certaine quantité de feuilles avant l'insolation, puis une même quantité après, c'est-à-dire en dosant tous les éléments de la plante, ainsi que ceux de l'atmosphère avant et après l'insolation, on pourrait connaître quelle proportion de chaque substance serait fixée dans le végétal ou éliminée.

Il a trouvé ainsi que sous l'action de la lumière il y avait sensiblement autant d'oxygène émis que d'acide carbonique éliminé. Ainsi dans quarante-et-une expériences, quinze ont donné de l'oxygène en excès, neuf égalité des deux gaz, et dix-sept expériences excès d'acide carbonique. La somme totale pour toutes les expériences a été de 1339 centimètres cubes d'acide carbonique décomposé et 1322 cent. cubes d'oxygène émis ; il y a eu un résidu de 16 cent. cubes probablement d'azote. Ce résultat peut s'énoncer ainsi :

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 54, p. 321.
(2) *Ibid.*, t. 66, p. 295.

Pour 100 d'acide carbonique décomposé il y a eu 98,75 d'oxygène émis et 1,25 de résidu.

Azote. — On a vu au commencement de ce paragraphe que les feuilles insolées sous l'eau donnent lieu à un dégagement d'azote; cet élément est-il fixé dans les plantes pendant l'action lumineuse? D'où vient l'émission d'azote que l'on observe quand les feuilles dégagent de l'oxygène sous l'eau? Telles sont les questions auxquelles les recherches des expérimentateurs déjà cités permettent de répondre.

Quant à l'émission d'azote, elle résulte des expériences faites depuis de Saussure par les différents observateurs qui ont étudié le dégagement de gaz des plantes insolées sous l'eau. M. Draper l'a observé dans le mémoire cité plus haut lors de l'action des rayons de diverse réfrangibilité sur un certain nombre de plantes. MM. Cloëz et Gratiolet en étudiant le dégagement d'oxygène avec les plantes aquatiques insolées et en se servant d'eau bouillie et privée d'azote ont vu la quantité de ce gaz diminuer à mesure que l'on prolongeait le temps de l'insolation et l'oxygène devenir de plus en plus pur; d'un autre côté, l'analyse d'une même quantité de plantes non insolées a donné une proportion plus grande d'azote, de sorte que l'émission de ce gaz par les feuilles sous l'eau est dû non-seulement à l'azote que l'eau peut contenir, mais encore à une altération des plantes.

Les recherches faites par M. Boussingault (1) en analysant complétement des quantités équivalentes de feuilles avant et après l'insolation, ainsi que l'atmosphère dans laquelle elles se trouvaient, sont venues démontrer que dans l'action de la lumière sur les feuilles il n'y a ni absorption ni émission d'azote, car il y a presque autant d'oxygène éliminé que d'acide carbonique absorbé, et la faible différence d'azote (1,25 pour 100) peut provenir de l'air interposé dans les feuilles. Il résulte de là que dans l'action lumineuse l'azote de l'air ne se fixe pas dans les feuilles, et que celui qui se trouve assimilé aux végétaux provient des composés ammoniacaux ou des matières transportées dans le végétal pendant la circulation de la séve (2). Quant à l'émission qui a lieu lors de l'insolation des feuilles sous l'eau, elle provient sans

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 4e série, t. 66, p. 295.

(2) La question de l'assimilation directe de l'azote de l'atmosphère par les plantes a été le sujet de longues discussions; mais, d'après ce qui vient d'être dit, il ne paraît pas qu'elle puisse avoir lieu, et l'on doit attribuer aux nitrates et aux composés azotés pouvant exister dans l'air ou dans le sol l'azote qui s'y trouve fixé.

doute d'une altération du végétal et de l'air interposé dans le liquide ambiant.

Dans l'acte de végétation il se manifeste un grand nombre de réactions, et des produits divers prennent naissance à certains moments de la vie végétale; l'absence ou la présence de la lumière dans certains cas peut alors intervenir. On a vu qu'en l'absence de la lumière, au lieu de fixer du carbone, la plante agit comme les animaux lors de leur respiration, brûle les matières carbonacées et émet de l'acide carbonique; aussi trouve-t-on dans les végétaux étiolés une matière azotée cristallisée, l'asparagine (1), dont M. Boussingault rapproche la production de celle de l'urée dans les animaux, assimilant ainsi l'une à l'autre les fonctions respiratoires des animaux et des végétaux privés de lumière. Cette substance, du reste, peut se présenter même dans les plantes exposées à la lumière, mais pendant les premières phases de leur existence alors qu'elles se comportent comme agents d'oxydation; ensuite, quand la végétation est plus avancée, la fixation du carbone a lieu sous l'influence de la lumière, et cette matière disparaît dans les plantes, celles-ci fonctionnant alors comme agent de réduction.

§ 6. *Coloration des fleurs et des tissus végétaux.*

La lumière donne lieu à d'autres effets de coloration dans les plantes qu'à la formation de la matière verte, et certaines parties du tissu végétal, particulièrement des fleurs et des fruits, ne doivent leur couleur qu'à son action. On pourrait dire que toutes les couleurs végétales sont produites par elle si l'on voulait entendre que sans son influence une plante ne pourrait parcourir toutes les phases de son existence; mais dans ce cas ce ne serait pas en vertu d'une action directe exercée par les rayons lumineux que l'effet aurait lieu, mais en raison d'effets secondaires, c'est-à-dire de réactions qui se passent dans les tissus végétaux pendant l'acte de la végétation; ainsi beaucoup de fleurs sont colorées au moment où elles s'épanouissent. Il se produit donc des composés qui peuvent être acides ou alcalins et dont les actions sur les matières contenues dans les tissus végétaux donnent lieu aux effets que l'on observe.

Il existe des plantes incolores qui paraissent parcourir les différentes phases de leur existence sans se colorer; les champignons sont dans ce

(1) Menici et Piria, *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 19, p. 575 et 919 (1844). — Boussingault, *Ann. de chimie et de physique*, 4e série, t. 13, p. 238 (1868).

cas. Dans les mines les plus obscures, certains de ces champignons peuvent se développer, ce qui est une conséquence de l'absence de coloration qui leur permet de se passer de l'influence de la lumière. Il faut remarquer toutefois qu'ils végètent aux dépens de la matière organique toute formée.

Ce ne sont pas seulement les fleurs qui présentent des colorations diverses, mais encore les feuilles de certaines plantes, principalement celles qui naissent dans le voisinage des fleurs.

Un certain nombre de fleurs qui naissent blanches se colorent ensuite par l'action de la lumière, preuve d'une action directe pour amener cette coloration. On peut citer à ce sujet les exemples suivants :

Le *cheiranthus chamæleo* a une fleur d'abord blanchâtre, puis jaune citron, puis rouge violacé. Le *stylidium fruticosum* a des pétales d'un jaune pâle à leur naissance, et ensuite blancs légèrement rosâtres. L'*œnothera tetraptera* a des fleurs d'abord blanches, puis roses, puis presque rouges. Le *tamarindus indica* a les pétales blancs le premier jour et jaunes le second. Le *cobæa scandens* a une couleur verdâtre le premier jour et violette ensuite. L'*hibiscus mutabilis* a une fleur qui naît le matin avec une couleur blanche, et qui devient rouge ou incarnat au milieu du jour et rouge le soir (1).

Les boutons floraux de l'*agapanthus umbellatus* sont encore blancs lorsqu'ils commencent à s'ouvrir ; ils prennent ensuite une teinte bleue. Si on enveloppe la fleur avant sa sortie de la spathe, ou au moment où elle s'ouvre, d'un papier noir qui intercepte la lumière, cette fleur reste blanche ; remise à la lumière, elle se colore ensuite graduellement tout en conservant une teinte plus pâle que celles qui se sont ouvertes au jour (2).

J'ai observé que si on laisse fleurir un pied de *crassula* à fleurs rouges dans une chambre peu éclairée, les pétales prennent seulement une teinte rosée passant au jaune à leur base ; le tube de chaque fleur est aussi jaune. Un séjour de plusieurs heures aux rayons directs du soleil donne lieu à une coloration rouge de toutes les corolles de ces petites fleurs. Si quelques parties de la plante sont garanties par une enveloppe en papier noirci, alors les fleurs cachées de cette manière conservent la teinte pâle qu'elles avaient à la lumière diffuse de la chambre. Ainsi pour quelques plantes la lumière diffuse suffit pour donner

(1) De Candolle, *Physiologie végétale*, t. 2, p. 911.
(2) *Biblioth. univ. de Genève*, nouvelle série, t. 52, p. 383 (1844).

leur coloration; pour d'autres, la lumière solaire directe ou une très-forte lumière diffuse est nécessaire.

Il est intéressant de signaler ici le fait que présente le lilas coloré (*syringa vulgaris*, principalement la variété nommée lilas de Marly) quand on le fait fleurir en culture forcée dans une serre chaude; au lieu d'être violet plus ou moins rouge, il est alors complétement blanc. Pour obtenir ces fleurs incolores, les jardiniers prennent dans un moment quelconque de l'hiver des pieds enracinés de lilas, et les plantant sous une bâche, ils obtiennent la floraison des panicules blanches dans l'espace de quinze ou vingt jours; une température constante de 15° environ suffit pour obtenir ce résultat; quand la température constante de la serre où se trouve les pieds de lilas est de 32 à 35°, on peut même obtenir la floraison en quatorze jours. Le temps nécessaire pour que les boutons floraux soient ouverts dépend, bien entendu, de la température du milieu ambiant; mais qu'elle soit plus ou moins élevée et que la serre soit éclairée ou privée de lumière, bien que les boutons floraux présentent une légère trace de coloration, quand les fleurs sont ouvertes elles sont tout à fait incolores. Tel est le moyen dont on se sert pour avoir pendant tout l'hiver des bouquets de lilas blancs.

M. Duchartre (1) a placé un pied de lilas dans l'intérieur d'une serre, mais de façon à ce que les branches se trouvent en partie dans l'atmosphère de la serre, contre les vitres, et soient bien éclairées, et que les autres branches, passant au travers d'une ouverture faite à une vitre, restent libres à l'air extérieur. La température moyenne étant de 15°, il a vu que le développement des branches dans la serre a été plus rapide que celui des branches placées à l'air libre, et que ces branches ont donné des panicules blanches au bout de dix-huit jours environ; deux semaines après, les branches de l'extérieur ont donné des fleurs colorées comme à l'état normal.

Ainsi dans une serre maintenue à 15° le principe colorant ne se développe pas dans le tissu des corolles du lilas, bien que les fleurs reçoivent une lumière assez vive. D'où peut provenir cette décoloration?

On ne peut dire que la privation seule de lumière soit la cause de la décoloration des fleurs du lilas; il pourrait se faire qu'elle dépendît d'une rapidité trop grande de végétation d'après laquelle la matière colorante

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 56, p. 939 (1863).

ne pourrait se produire, ou d'une trop faible somme de lumière reçue par la plante forcée, ou bien peut-être de ces deux causes réunies ; à moins de supposer, comme l'a fait M. Duchartre, que l'atmosphère de la serre soit douée d'un pouvoir d'oxydation plus énergique que l'air extérieur pouvant amener la destruction de la matière colorante, ce qui n'est pas démontré ; il faudrait, pour s'en assurer, varier les circonstances de l'expérience et suivre la floraison dans la serre quand, la température étant plus basse, on se trouverait dans des conditions calorifiques analogues aux conditions extérieures. On voit qu'il serait intéressant d'étudier de nouveau ce phénomène et d'examiner quelle pourrait être l'influence des différents rayons lumineux sur les fleurs ainsi décolorées et encore attenant à leur tige, pour amener leur coloration naturelle.

L'enveloppe des fruits donne lieu comme les fleurs à des effets de coloration sous l'influence de la lumière. On sait en effet que les couleurs rouges des pêches ne sont dues qu'à l'action de la lumière, ainsi que ces tons jaunes et rouges des pommes, du raisin et d'un grand nombre de fruits. Mais, bien qu'on ait reconnu ces effets généraux de coloration, on n'a pas recherché quelles étaient les parties du rayonnement lumineux qui exerçaient une action, et si la même partie de l'image prismatique qui concourt à la formation de la matière verte produisait dans les plantes les colorations dont il est ici question ; ce serait une étude qui présenterait un grand intérêt.

Si pendant la vie végétale la lumière, par son action, donne lieu aux différentes substances renfermées dans les végétaux et principalement aux différentes couleurs des feuilles et des fleurs, après la mort ces matières soumises à l'action de l'oxygène sous l'influence des rayons lumineux se décolorent peu à peu, comme les matières colorantes dont il a été question, livre II, page 47 ; elles subissent la loi commune des matières organiques, et sont brûlées par l'action des rayons lumineux. Quelquefois même, quand la lumière est trop vive, celle-ci agit sur les couleurs des végétaux pendant la végétation pour les détruire : ainsi quand on cultive les tulipes on les garantit du soleil, sans quoi leurs couleurs pâlissent.

§ 7. *Intensité de l'action chimique produite par les rayons solaires sur les plantes. Résumé du chapitre Ier.*

On voit en résumé que la lumière est indispensable à la vie végétale, et que si certaines plantes peuvent végéter pendant quelque temps

dans l'obscurité, elles sont languissantes et étiolées, et ne sauraient parcourir les différentes phases de leur existence.

Les éléments les plus essentiels qui constituent les plantes sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, auxquels on peut joindre l'azote, si l'on fait abstraction des substances telles que le silicium, le phosphore, le soufre ainsi que des bases, comme la potasse, la soude, la chaux, etc., qui ne s'y trouvent qu'en plus faibles proportions. Ces quatre substances se rencontrent dans l'atmosphère, et si les trois dernières sont fixées dans les plantes lors du mouvement de la séve, par des réactions chimiques non encore connues, dont nous n'observons que le résultat final, le carbone est fourni par l'acide carbonique, et c'est la lumière qui détermine l'action en vertu de laquelle il s'accumule dans les végétaux.

Il est très-remarquable de voir que c'est par suite de la présence d'une très-petite quantité d'acide carbonique dans l'atmosphère et dans le sol végétal, que cette assimilation du carbone a lieu à la surface de la terre. Si l'on s'en tient à l'atmosphère seule, on estime en moyenne à $\frac{4}{10000}$ du volume de l'air, le volume du gaz acide carbonique qui existe à un moment donné dans l'enveloppe gazeuse de la terre. En supposant que l'acide carbonique soit répandu partout en même proportion, comme le poids de l'atmosphère équivaut au poids d'une couche d'eau de $10^{m},33$ répandue sur la surface de la terre, le poids du carbone contenu dans l'acide carbonique existant dans l'air équivaut à celui d'une couche de houille, supposée en carbone pur, qui aurait 1 millim. $\frac{1}{4}$ d'épaisseur et qui envelopperait partout la terre. Cette quantité est très-minime, et cependant c'est elle qui fournit le carbone qui se fixe à chaque instant dans les végétaux. On doit ajouter que la perte de l'acide carbonique est compensée à chaque instant par les quantités du même gaz que le sol peut émettre lors de la décomposition des matières organiques, ainsi que par l'acide carbonique qui provient de la respiration des animaux.

On peut avoir une idée de la quantité de travail déterminée par l'action de la lumière solaire sur la végétation et dont on pourrait retrouver l'équivalent lors de la combustion des végétaux, en évaluant la quantité de carbone fixée pendant un temps donné par les végétaux, car le carbone provient, comme on l'a vu, de la décomposition de l'acide carbonique. Il serait nécessaire de tenir compte des autres éléments dont se composent les plantes ; mais comme l'oxygène et l'hydrogène sont en des proportions peu différentes de celles qui sont nécessaires

pour former de l'eau, et que les autres matières entrent pour une moindre quantité, l'erreur que l'on commet en s'en tenant au carbone ne peut changer beaucoup les indications générales que l'on va donner, et qui ne sont d'ailleurs que très-approximatives.

Dans nos climats tempérés, 1 hectare de forêt produit à peu près annuellement 1800 kilogr. de carbone; M. Chevandier (1) a trouvé en effet en analysant les différents produits de deux forêts, lors de coupes successives, la quantité de chaque espèce de marchandise qu'on en a tirée, charpente, bois à brûler, fagots, etc., étant connue :

	Carbone.	Hydrogène.	Oxygène.	Azote.	Cendres.
	kil.	kil.	kil.	kil.	kil.
Pour une forêt de 69 ans.	1754	213	1507	33	48
Pour une forêt de 58 ans.	1854	225	1586	36	53

C'est-à-dire à peu près annuellement 1800 kilogrammes de carbone fixés par hectare.

Cette quantité de carbone représente une couche de houille qui recouvrirait le sol et qui aurait environ $\frac{13}{100}$ de millimètre d'épaisseur; comme on vient de voir que l'acide carbonique qui se trouve dans l'air donnerait à un moment donné une couche de houille dix fois plus épaisse si tout le carbone qu'il contient venait à être fixé sur le sol, il en résulte que si toute la surface du globe était couverte d'une végétation égale à celle des deux forêts ci-dessus, et que l'acide carbonique absorbé ne se renouvelât pas, au bout de dix ans environ l'air en serait entièrement dépouillé.

Dans ces forêts la végétation commence vers la fin d'avril, pour s'arrêter à la fin de septembre quand les feuilles commencent à jaunir; on ne peut compter ainsi que sur cinq mois de végétation ; cela donne 360 kilogr. de carbone fixés par mois de végétation active sur chaque hectare. Si l'on suppose donc que la végétation soit la même pendant toute l'année, la quantité de carbone fixée par les arbres par hectare serait de 4320 kilogrammes.

Le nombre indiqué ci-dessus est relatif à notre pays ; mais dans les régions équatoriales, où la végétation est plus active, il serait certainement supérieur. Si l'on considère les autres espèces de culture dans nos climats, la proportion de carbone fixée annuellement peut être plus

(1) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. 10, p. 129 (1844).

grande : ainsi M. Chevandier a reconnu que pendant une année dans une prairie bien fumée il se formait par hectare 3500 kilogr. de carbone fixés dans les plantes; M. Boussingault a obtenu par la culture des topinambours, qui donne le chiffre le plus élevé, la quantité de 6310 kilogr. On peut donc considérer comme variant de 1500 à 6000 kilogr. la proportion de carbone fixée annuellement par hectare des diverses cultures dans les régions tempérées, et cela par l'action de la lumière sur les différents végétaux.

D'après cela, si l'on cherche combien cette quantité de carbone en brûlant donne de chaleur, on peut avoir une idée de la quantité du travail produit par la lumière sur les végétaux à la surface de la terre : comme 1 kilog. de carbone fournit 8000 unités de chaleur, c'est-à-dire la quantité de chaleur qui élèverait 8000 kilogr. d'eau de 0 à 1°, les nombres ci-dessus donnent ces quantités de chaleur comme variant de 12000000 à 48000000. D'après le nombre cité dans le premier livre de ce volume, page 43, les rayons solaires en un an donnent à chaque centimètre carré de la surface de la terre 231675 unités de chaleur, dont une moitié environ est arrêtée par l'atmosphère, de sorte qu'il n'arrive vers nous que 115837 unités, c'est-à-dire 115837 fois la quantité de chaleur qui élèverait 1 gramme d'eau de 0 à 1°; or 1 hectare renfermant 100000000 centimètres carrés, le nombre d'unités de chaleur correspondant à l'action des rayons solaires étant transformé en kilogrammes serait,

$$100000000 \times 115^{\text{kil.}},827 = 11583700000.$$

Par conséquent la quantité de travail effectuée annuellement par hectare lors de la décomposition de l'acide carbonique sur les feuilles sous l'influence solaire serait donc dans nos climats, par rapport à la quantité de travail fournie lors de l'échauffement des rayons solaires, compris entre les valeurs minima et maxima :

$$\frac{12}{11583} \quad \text{et} \quad \frac{48}{11583}$$

c'est-à-dire entre 1 et 4 millièmes de l'action due à l'échauffement solaire.

On a négligé l'action exercée par les substances autres que le carbone qui se trouvent dans les végétaux, et l'on sait qu'il y a fixation d'hydrogène et d'azote; mais si l'on tenait compte de la quantité de travail qu'elles représentent on n'arriverait pas à augmenter de moitié les nombres qui

viennent d'être indiqués. On peut donc dire, en somme, que la quantité de travail fournie par les rayons solaires pendant l'acte de la végétation à la surface de la terre dans nos climats, et qui se trouve emmagasinée dans les plantes pour être utilisée ensuite lors de la combustion ou de l'emploi de ces matières, n'atteint pas un centième de l'action calorifique produite par l'influence de ces mêmes rayons.

On vient de voir que pendant toute l'année, mois de végétation ou de non-végétation compris, un hectare de forêt dans nos climats fixe par mois 150 kilogr. de carbone, c'est-à-dire par jour de vingt-quatre heures, la nuit comprise, 5 kilogram. On sait, d'un autre côté, qu'un homme de trente à quarante ans dans l'acte de la respiration fournit une quantité d'acide carbonique qui équivaut à celle donnée par la combustion de 11 grammes de carbone par heure; une femme du même âge donne 7 gr. de ce gaz : on peut donc admettre en moyenne 9 gr. par personne. Il résulte de là qu'en vingt-quatre heures une personne fournit la quantité d'acide carbonique équivalant à 216 grammes, et que vingt-trois personnes produisent dans le même temps, par l'acte de la respiration, la quantité de carbone qui est fixée en moyenne pendant l'année par la végétation d'un hectare de forêt. Les autres cultures donneraient des résultats différents, car les prairies dans nos climats donnent une fixation de carbone égale à celle que produisent dans le même espace de temps quarante-six personnes, et les cultures plus abondantes un nombre encore plus grand.

Cette différence dans les phénomènes chimiques de la vie animale et de la vie végétale montrent donc deux genres de réactions dont le résultat final est opposé, puisque les animaux sont des agents d'oxydation et les végétaux des agents de réduction ; les premiers en effet dans leur respiration consomment de l'oxygène, produisent de l'acide carbonique et dégagent de la chaleur, tandis que les végétaux fixent du carbone, de l'hydrogène et de l'azote, émettent de l'oxygène et exigent pour cela l'influence d'une force physique extérieure, la lumiere, dont l'action équivaut à une certaine quantité de chaleur, force qui est pour ainsi dire emmagasinée dans les plantes. L'oxygène consommé par les animaux est donc restitué par les plantes sous l'influence de la lumière, et l'acide carbonique fourni par les animaux est décomposé par elles; l'équilibre se trouve ainsi maintenu dans l'atmosphère à l'époque actuelle (1).

(1) Il est possible que dans les âges antérieurs l'acide carbonique ait été en plus grande

CHAPITRE II.

Effets produits sur les animaux.

---

§ 1. *Action exercée sur les infusoires.*

La lumière solaire, dans certaines circonstances, peut exercer une influence sur les animaux; mais on ne peut plus dire, comme pour les végétaux (1), qu'elle est indispensable aux différentes phases de leur existence; elle n'intervient chez eux d'une manière nécessaire que dans les phénomènes de la vision pour leur faire connaître les couleurs, les formes et les distances des objets extérieurs.

Si l'on considère des animaux placés à des degrés différents dans l'échelle des êtres organisés et qu'il ne soit pas question des phénomènes de la vision, dont on s'occupera dans le livre suivant, on peut trouver des effets plus ou moins marqués : chez les infusoires l'action lumineuse est puissante, et l'on va voir que ces êtres sont aussi impressionnables que les végétaux à l'influence lumineuse; chez d'autres animaux, comme les batraciens, cette action est moins sensible, et quand on arrive aux mammifères, il n'est pas démontré que la lumière intervienne dans les diverses conditions de leur vie et qu'elle agisse autrement que pour provoquer la coloration de la peau ou du pelage.

Il se développe dans les eaux stagnantes, sous l'influence de la lumière, un grand nombre d'êtres organisés microscopiques, comme la matière verte qui a été observée par Priestley et étudiée par Senebier et d'autres physiologistes. Ces êtres organisés appartiennent les uns au règne végétal, les autres au règne animal, et M. Aug. Morren (2) a découvert que ces animaux comme ces végétaux ont la faculté d'aug-

proportion, comme on serait tenté de le croire d'après l'abondance des roches calcaires qui existent dans les diverses formations géologiques. (Voir Becquerel et Ed. Becquerel, *Traité de physique terrestre et de météorologie.*)

(1) A l'exception peut-être de quelques criptogames, comme on l'a vu antérieurement.

(2) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. 1, p. 456, et t. 12, p. 5. — A. Morren et Ch. Morren., *Recherches sur l'influence qu'exercent la lumière, les animacules, etc., sur la qualité et la quantité des gaz que les eau peuvent contenir;* Bruxelles, 1841.

menter à certains moments la proportion d'oxygène contenue dans les eaux qui les baigne ; il a reconnu que c'était par les jours les plus beaux et les plus chauds de l'année que l'oxygène est le plus abondant. Habituellement la quantité d'oxygène contenue dans l'eau est de 30 à 32 pour 100 du gaz renfermé; en présence des animalcules, cette quantité peut s'élever à près du double, c'est-à-dire à 61 pour 100.

MM. A. Morren et Ch. Morren ont fait sur ce sujet plusieurs séries de recherches, d'après lesquelles il résulte que l'oxygène et l'acide carbonique que les eaux renferment sont en raison inverse l'un de l'autre, ce qui semble montrer que l'eau s'oxygène aux dépens de l'acide carbonique qui est décomposé par les infusoires de couleur verte (monades et volvox). L'oxygénation varie très-sensiblement dans l'espace de vingt-quatre heures : elle est à son minimum au lever du soleil, et atteint son maximum de quatre à cinq heures du soir ; un temps couvert, froid et pluvieux fait disparaître la succession régulière de ces phénomènes. Si les animalcules disparaissent, le maximum d'oxygénation disparaît avec eux. L'oxygène qui provient de ces divers effets est versé dans l'atmosphère pendant le jour comme pendant la nuit, le soir avec une énergie croissante, et la nuit en moindre proportion.

On peut conclure de là que les animalcules verts, comme la partie verte des plantes, dégagent de l'oxygène sous l'influence de la lumière solaire et diffuse en décomposant l'acide carbonique, et en son absence émettent une certaine quantité de ce gaz. Indépendamment des animalcules verts, il y a d'autres animalcules, de couleur rouge, qui produisent les mêmes effets. Quant aux rayons actifs, ils sont compris dans la partie la moins réfrangible de l'image prismatique, tandis que les rayons bleus et violets paraissent sans influence.

Voilà donc un exemple remarquable de l'action exercée par la lumière sur les infusoires, dont les tissus agissent sur l'acide carbonique à la manière des tissus végétaux. Il faut même remarquer que lorsque l'eau dans un espace limité contient des poissons, ceux-ci absorbent rapidement l'oxygène tenu en dissolution, et les infusoires peuvent lui restituer cet oxygène par la décomposition de l'acide carbonique sous l'action des rayons solaires.

§ 2. *Influence de la lumière sur certaines fonctions des animaux.*

M. Moleschott (1) a étudié la respiration des grenouilles sous l'influence d'une lumière plus ou moins vive en mesurant la quantité d'acide carbonique exhalée, les unes renfermées dans des vases soustraits à l'action de la lumière, les autres sous l'influence de cet agent. D'après la moyenne des nombres obtenus dans un grand nombre d'expériences, il a trouvé que le poids de l'acide carbonique produit dans l'obscurité est au poids du même gaz exhalé à la lumière dans le rapport de 100 : 125.

Il a voulu examiner ensuite si cette influence est exercée par l'intermédiaire des yeux ou par celui de la peau, ou bien enfin par tous les deux à la fois. Des grenouilles ont été privées de la vue à l'aide d'une cautérisation à l'azotate d'argent, et elles ont été comparées à des animaux intacts; les nombres obtenus ont donné le rapport moyen de 100 : 114 comme exprimant la proportion d'acide carbonique produite par les grenouilles aveuglées par rapport à celui produit par les grenouilles intactes.

Voici quelles sont les conclusions générales de ses recherches :

1° Les grenouilles, pour les mêmes unités de poids et de temps, exhalent de $\frac{1}{12}$ et jusqu'à $\frac{1}{4}$ d'acide carbonique en plus lorsqu'elles respirent sous l'influence de la lumière que dans l'obscurité, la température étant la même ou différant peu.

2° La production de l'acide carbonique s'accroît en raison directe avec l'intensité de la lumière à laquelle ces animaux sont exposés.

3° L'influence que la lumière exerce, en augmentant la quantité d'acide carbonique, est transmise en partie par les yeux, en partie par la peau.

M. J. Béclard (2) a soumis différents animaux à l'influence de la lumière sous des cloches colorées ; il a observé que des oiseaux ou des petits mammifères dont la peau est couverte de plumes ou de poils et que la lumière ne frappe pas à sa surface, ne présentent pas dans un temps donné, par la respiration, une quantité d'acide carbonique qui soit notablement différente.

Il n'en est pas de même des grenouilles, dont la peau est nue et dont

(1) *Ann. des sciences naturelles*, 4ᵉ série, zoologie, t. 4, p. 209 (1855).
(2) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 46, p. 441 (1858).

la respiration cutanée est énergique; sous l'influence des rayons verts un même poids de grenouilles a produit dans un même temps une quantité d'acide carbonique plus considérable que dans les rayons rouges. Dans cette circonstance la peau de l'animal paraît avoir une influence sur les résultats observés, car les rapports sont inverses quand les grenouilles en sont privées.

Plusieurs expériences tentées sur l'exhalaison cutanée de la vapeur d'eau ont indiqué que dans l'obscurité les grenouilles ont perdu par évaporation une quantité d'eau moitié moindre qu'à la lumière diffuse ordinaire, et qu'à la lumière violette l'effet a été le même que dans ce dernier cas.

Dans la même série de recherches, M. Béclard a observé que des œufs de mouche (*musca carnaria*) placés en même temps sous des cloches de verre coloré ont donné naissance à des vers; mais si au bout de plusieurs jours on compare entre eux les vers éclos sous ces cloches, on remarque que leur développement est très-différent : les vers les plus développés correspondent à la lumière violette ou bleue, et les vers qui se trouvent sous les cloches rouges, jaunes, blanches ou vertes sont moins développés.

Il n'est pas prouvé, d'après ces diverses expériences, que la lumière intervienne directement dans le jeu des organes, en admettant même que les conditions extérieures autres que celles qui proviennent d'une différence d'illumination soient les mêmes; il serait possible que la lumière produisît simplement une excitation sur la peau d'où résulterait peut-être une agitation des animaux, et comme effet secondaire une augmentation dans les phénomènes respiratoires.

Du reste les fibres nerveuses et musculaires peuvent être excitées directement par la lumière, et M. Brown-Sequard (1) a montré que l'iris des yeux des batraciens et des poissons pouvait se contracter sous l'influence des rayons lumineux, soit sur l'œil intact, soit sur l'œil enlevé de l'orbite. Des différents rayons lumineux, ce sont les rayons les plus éclairants qui paraissent agir le plus vivement.

D'après M. Brown-Sequard, si l'iris peut être excité directement par la lumière chez certains animaux et non pas chez d'autres, ce fait paraît tenir à une épaisseur de la membrane, et il pense que la disposition des tissus en couches très-minces est une condition essentielle pour

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 25, p. 483.

que les rayons lumineux puissent exercer leur action. Il serait donc possible que d'autres tissus que ceux de l'iris fussent excités par l'action de la lumière, quoiqu'à des degrés différents.

Peu de recherches ont été faites dans le but d'examiner si la lumière pouvait exercer une influence sur d'autres fonctions des animaux que les fonctions respiratoires et particulièrement sur leur développement. W. Edwards (1) a fait quelques expériences sur les batraciens; il a placé des œufs de grenouille dans l'eau dans deux vases dont l'un ne recevait pas la lumière et l'autre était transparent; les œufs exposés à la lumière se développèrent successivement, tandis qu'à l'obscurité aucun œuf ne vint à bien; sur quelques-uns cependant il y avait des marques de développement de l'embryon.

Des têtards placés au fond de la Seine et privés de lumière se développèrent plus tard que ceux qui étaient restés exposés à la lumière et qui avaient la faculté de venir à la surface de l'eau; mais dans ce cas les effets de la respiration n'ont peut-être pas été les mêmes et les différences observées ne tiennent peut-être pas seules au défaut d'illumination du milieu. Il plaça également des têtards de crapaud les uns dans des vases non transparents, les autres dans des vases éclairés : tous les têtards exposés à la lumière subirent leur métamorphose, et parmi ceux qui étaient restés dans l'obscurité un seul se développa; l'autre persista dans sa forme première et caractéristique du jeune âge; il acquit même de grandes dimensions. Edwards avait observé le même effet chez les têtards éclos à l'obscurité.

Quelques expériences faites depuis n'ont pas confirmé ces résultats : on a vu plus haut qu'avec les œufs de mouche M. Béclard avait observé un développement plus facile à la lumière, mais qu'il avait eu lieu également à l'obscurité; M. Higginbottom (2) a observé que les têtards de batracien peuvent se développer à l'obscurité comme à la lumière, et qu'il n'y a aucune différence quand les conditions de température sont les mêmes.

On ne peut dire, d'après cela, que l'action de la lumière chez les batraciens contribue au développement des différentes parties du corps et que son absence tende à faire prédominer la première forme, car la transformation de ces animaux est encore fort obscure, et on ne connaît

(1) *De l'influence des agents physiques sur la vie*, Paris, 1824, ch. 15, p. 394.

(2) *On the influence of physical agents*, etc., *Philosoph. transact.*, t. 140, p. 135 (1850).

pas les conditions nécessaires pour les accélérer ou les arrêter. Il en est de même ici que pour les axolotls, qui, d'après les observations faites par M. A. Duméril au Muséum d'histoire naturelle (1), dans les mêmes vases et dans des conditions en apparence semblables, peuvent perdre leurs branchies et se transformer, ou bien subsister sous leur forme première. On ne sait pas non plus, comme on l'a supposé, si le protée anguiforme, qui vit dans les eaux souterraines de la Carniole, tient sa forme de l'absence de la lumière, et s'il représente le premier état d'un animal qui étant adulte et dans des conditions normales serait autrement constitué.

On ne peut invoquer le dépérissement des personnes qui vivent dans un lieu obscur comme une preuve de l'étiolement dû à l'absence du rayonnement lumineux; car des causes délétères diverses peuvent agir aussi bien que la privation de lumière. Cependant on doit observer que les yeux d'un certain nombre d'animaux qui vivent dans l'obscurité ne sont pour ainsi dire qu'à l'état embryonaire, et dès lors il ne se produit plus chez eux aucune excitation nerveuse de la part de l'agent lumineux; il pourrait donc se faire que l'absence de l'excitation produite sur les nerfs optiques pût influer sur les effets généraux des organes, et dans ce cas ce serait par une action secondaire, en se propageant de l'organe de la vision dans toute l'économie, que l'on pourrait dire que la lumière est favorable aux animaux; les expériences de M. Moleschott dont il a été question plus haut viennent à l'appui de cette supposition.

On a cité les habitants des régions équinoxiales, Chaymas, Caraïbes, Mexicains, Péruviens, etc., qui, d'après M. de Humboldt (2), ont le corps très-bien développé et bien conformé, comme offrant l'exemple de l'influence de la lumière sur la conformation et sur la santé; mais ce résultat pourrait tenir à d'autres causes économiques, et il faudrait savoir, par exemple, si chez ces peuples des mariages ont lieu entre des individus de mauvaise conformation comme dans nos populations.

§ 3. *Coloration des tissus des animaux. Insolation.*

La coloration brune de la peau que l'on observe sur les personnes exposées au soleil est due à l'action propre de la lumière, et c'est, en

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 60, p. 765, et t. 61, p. 775. — *Bulletin de la Société d'acclimatation*, 2e série, t. 1, 2, 3 et 4.

(2) *Voyage aux régions équinoxiales*, Paris, 1814, p. 471.

dehors des phénomènes de la vision, l'effet le plus immédiatement appréciable que cet agent puisse produire sur les animaux. Des observations semblables ont été faites sur la peau du nègre, qui devient également plus foncée sous l'influence solaire. Ce phénomène ne provient pas de l'action de la chaleur, mais est dû à une action propre de la lumière, analogue à celles qui ont été étudiées antérieurement; en effet, dans nos usines, les ouvriers qui sont exposés à une forte chaleur conservent leur peau blanche, et chacun sait que c'est au printemps que les habitants de la campagne voient leur teint brunir.

Cette coloration ne paraît pas devoir aller au delà d'un certain terme, et on ne peut admettre que le climat puisse modifier assez la couleur de la peau pour la changer complétement, du moins depuis les temps historiques; ainsi les Arabes et les Kabyles, de race blanche, bien qu'habitant des contrées méridionales où se trouvent des nègres, ont bien le teint basané, mais ne sont pas noirs; il faut les distinguer de ceux qui se sont mélangés à la race nègre. Toutefois, les observations de M. le Dr Simonot (1) sur certains Arabes de la rive droite du Sénégal, celles de M. Duveyrier (2) sur les populations du Sahara, montrent que selon l'habitat la couleur des individus de même race peut varier du noir proprement dit aux teintes plus ou moins basanées (3).

Le pelage des mammifères et des oiseaux reçoit également une influence de la lumière; leur dos est en général plus brun que le ventre, et leur pelage d'été est plus foncé que celui d'hiver. Peut-être doit-on faire intervenir l'action de la lumière conjointement avec celle de la chaleur pour expliquer pourquoi dans les régions équatoriales et tropicales se trouvent les animaux qui présentent les nuances les plus vives et les plus belles couleurs?

Insolation. — L'effet auquel on a donné le nom de coup de soleil est un érythème dû non pas à une élévation de température, mais à une insolation très-vive; car il y a des individus qui en sont atteints au printemps alors que la température est peu élevée. Une lumière artificielle suffisamment intense et placée très-près peut agir de même; ainsi l'arc voltaïque, quand il est produit par une pile puissante, donne un érythème semblable, ce qui montre bien que cette affection est due à l'influence de la

(1) *Bulletin de la Soc. d'anthropologie.*
(2) *Voyage au pays des Touareg.*
(3) De Quatrefages, *Rapport sur les progrès de l'anthropologie*, 1867.

lumière. Avec une pile à acide azotique de 600 éléments, l'arc voltaïque, d'après Despretz, a donné lieu rapidement à cet effet sur la figure des personnes placées à peu de distance des charbons polaires (1).

La partie violette et ultra-violette du rayonnement lumineux paraît être la cause de cette action, car les écrans en verre d'urane, qui absorbent presque toute la partie la plus réfrangible du spectre lumineux, préserve les yeux des opérateurs exposés à l'irradiation de l'arc voltaïque (2). L'action exercée sur la peau, comme la plupart des actions chimiques présentées sur les matières organiques, a donc lieu sous l'influence des rayons lumineux les plus réfrangibles.

Cette influence exercée par la lumière sur la peau, et qui se manifeste par une coloration plus ou moins marquée et par une inflammation quand elle est trop vive, pourrait peut-être exister à un bien moindre degré lors de l'action de la lumière diffuse ; on pourrait alors concevoir que l'excitation qui en résulterait, par action secondaire, pourrait exercer quelque influence sur le jeu des organes. Ce ne serait donc que dans ces conditions, et en dehors bien entendu des phénomènes de la vision, que la lumière interviendrait dans les fonctions des animaux.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 29, p. 712.
(2) Brown-Sequard, *Journal de physiologie*, t. 1er, p. 627 (1858).

LIVRE V.

DE LA VISION.

Le plan de cet ouvrage ne comporte pas l'étude de la manière dont les rayons lumineux pénètrent dans l'œil pour nous fournir la notion des objets extérieurs, non plus que celle du mécanisme des sensations; la première est du ressort de l'optique géométrique, la seconde de la physiologie. On doit donc se préoccuper seulement des effets directement appréciables de la lumière sur l'organe de la vue; les effets de ce genre, tels par exemple que la phosphorescence de durée plus ou moins longue, que présentent certaines parties de l'œil sont excessivement restreints; les autres effets immédiats de la lumière sur notre organe visuel ne sont pour la plupart appréciables que par la sensation qu'ils nous font éprouver : il est donc impossible le plus souvent de démêler la part d'action de l'organe qui reçoit les impressions de celle de l'appareil sensitif qui porte ces impressions à la connaissance de notre être intelligent.

L'intervention de cet appareil est évidente dans l'appréciation du groupement des rayons suivant certaines directions, indépendamment de leur nature, c'est-à-dire de la couleur, appréciation d'où résultent les jugements que nous portons sur les objets extérieurs; mais on ne saurait absolument rien préciser à ce sujet quant aux impressions dépendant de la nature des rayons lumineux. On ne saurait dire. par exemple, si la combinaison des couleurs est une opération s'effectuant dans les milieux de l'œil, sur la rétine ou bien dans le cerveau.

Cette difficulté dans le classement des phénomènes visuels surprendra moins si l'on songe que l'on est réduit à des conjectures relativement au mode d'action de la lumière sur la partie sensible de notre œil, la rétine, là où l'on voit se souder l'appareil nerveux avec l'appareil optique. Est-ce une action purement mécanique comme le pensaient Newton, Melloni, Seebeck, etc., une action électrique directe suivant l'idée de M. Dubois-Reymond, une action calorifique ou photo-chimique

exercée sur les liquides en contact avec la rétine? La première hypothèse semble être la mieux en rapport avec les faits, et le mouvement vibratoire transmis à la rétine par les ondes lumineuses donne probablement aux tissus nerveux l'impression d'où résulte la sensation de la lumière.

Il sera donc question des sensations lumineuses au point de vue de l'*intensité*, de la *durée*, et de l'*appréciation des couleurs*. Mais il est nécessaire auparavant de donner une description succincte de l'œil et de signaler quelques phénomènes accessoires dont il importe de pouvoir se rendre compte pour ne pas les confondre avec des effets d'un autre genre.

CHAPITRE PREMIER.

Constitution de l'œil.

§ 1er. *Description de l'œil humain. — Accommodation*

L'œil humain, qu'on peut regarder comme le type de l'organe visuel des vertébrés, se présente dans son aspect général comme un sphéroïde de révolution autour d'une droite dont la direction dans la figure 61 serait celle de EM.

La partie la plus extérieure de cet organe (abstraction faite des muscles moteurs, dont on voit deux en N et O) est constituée par une sorte de coque solide H, blanche, opaque, qu'on appelle la *sclérotique;* elle est représentée en blanc sur la figure. A la partie antérieure de l'œil, en A, sur un diamètre égal à peu près au tiers de celui du globe oculaire, cette coque est remplacée par une partie transparente, d'une courbure plus forte, qu'on appelle la *cornée transparente.*

En *m*, c'est-à-dire en un point situé sensiblement sur un plan diamétral horizontal, mais un peu du côté du nez, la sclérotique est percée d'un trou destiné à laisser passer le *nerf optique* M.

La cornée est composée de différentes couches, dont le détail ne saurait trouver place ici, non plus que les diverses particularités de son insertion dans la sclérotique.

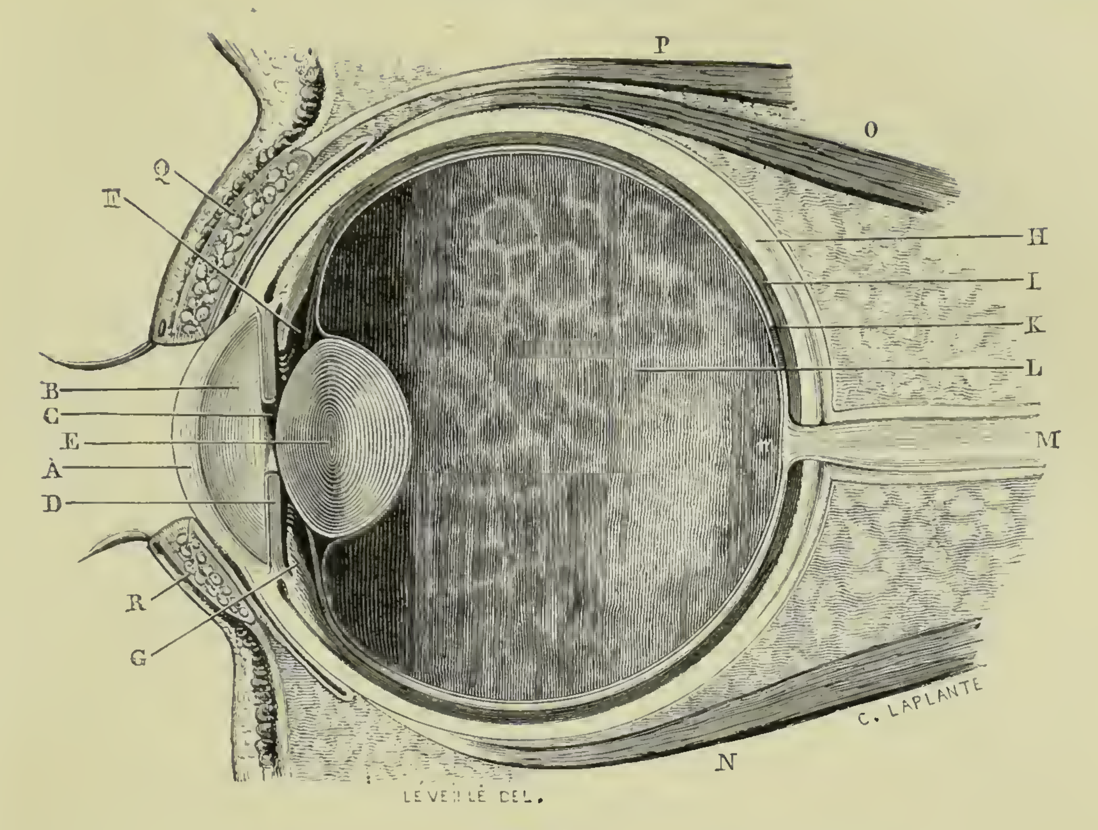


Fig. 61.

Après la sclérotique et la cornée, on rencontre le système de l'*uvée*, qui est composé de la *choroïde* et de l'*iris*.

La *choroïde* I est une membrane mince, d'une couleur foncée, qu'elle doit à des cellules pigmentaires; elle renferme une grande quantité de vaisseaux sanguins capillaires. Aux environs de la partie correspondante à la cornée transparente, en G, la choroïde affecte la forme de replis membraneux, au nombre de 70 environ, auxquels on donne le nom de *procès ciliaires*.

Le système de l'*uvée* se termine enfin par l'*iris*, sorte de diaphragme circulaire D percé d'une ouverture C qu'on appelle la *pupille*. Cette ouverture peut se rétrécir ou s'agrandir sous l'influence de certaines causes physiologiques, indépendantes de la volonté, de manière à permettre l'admission de faisceaux lumineux plus ou moins considérables. La dilatation de la pupille s'opère au moyen de fibres musculaires jusqu'ici mal définies; son rétrécissement est dû à la contraction d'un muscle circulaire, le *sphincter de la pupille*, qui entoure le bord de celle-ci sous la forme d'un anneau d'un millimètre environ de largeur.

Quand on regarde un œil vivant, l'iris paraît bombé par l'effet des réfractions de la partie antérieure de l'œil; mais il est sensiblement plan. C'est de la coloration de l'iris, variable avec les individus, que dépend ce que l'on appelle généralement la *couleur des yeux.*

Après la choroïde on trouve l'intérieur de l'œil tapissé d'une membrane très-mince K (représentée en blanc sur la figure), qui peut être considérée comme l'épanouissement d'une masse nerveuse concentrée en *m*, point d'insertion du nerf optique. Quoique cette membrane soit bien mince (son épaisseur varie de $0^{mm},22$ au fond de l'œil, à $0^{mm},09$ vers la partie antérieure), l'examen microscopique a pu y faire distinguer une série de huit à dix couches présentant des caractères plus ou moins tranchés, dont le détail ne saurait trouver place ici.

Dans une région située entre K et L, la rétine de l'homme, ainsi que celle du singe, présente sur un espace très-restreint une couleur jaune caractéristique, qui lui a fait donner le nom de *tache jaune* (*macula lutea*). Au centre de la tache jaune se remarque une légère dépression très-transparente, à laquelle on donne le nom de *fovea centralis.*

La tache jaune est caractérisée par quelques particularités anatomiques, encore peu étudiées; mais on sait d'autre part que c'est le lieu de la vision la plus distincte, c'est-à-dire que lorsqu'on veut examiner en détail une région déterminée de quelque objet, on donne à l'œil une direction telle que l'image de cette partie de l'objet vienne se faire sur la tache jaune.

La rétine possède un système spécial de vaisseaux sanguins, artériels et veineux, qui pénètrent dans l'œil par l'axe du nerf optique. Dans sa partie antérieure la rétine change de constitution en venant se souder aux procès ciliaires.

Comme dernière enveloppe intérieure de l'œil, on trouve la *membrane hyaloïde,* très-mince, parfaitement transparente, qui recouvre toute la rétine à laquelle elle est adhérente. A sa partie antérieure, la membrane hyaloïde porte le *cristallin* E, aux bords postérieurs duquel elle se soude, tandis qu'une autre membrane plissée F, appelée la *zonule de Zinn*, le maintient par sa partie antérieure.

Par sa face antérieure, le cristallin est en contact avec l'iris, au moins lorsque celui-ci est moyennement ouvert.

Le cristallin est une masse organisée, de consistance gélatineuse, dont la dureté et la densité paraissent augmenter de la circonférence au centre, et qui est contenue dans une enveloppe membraneuse mince,

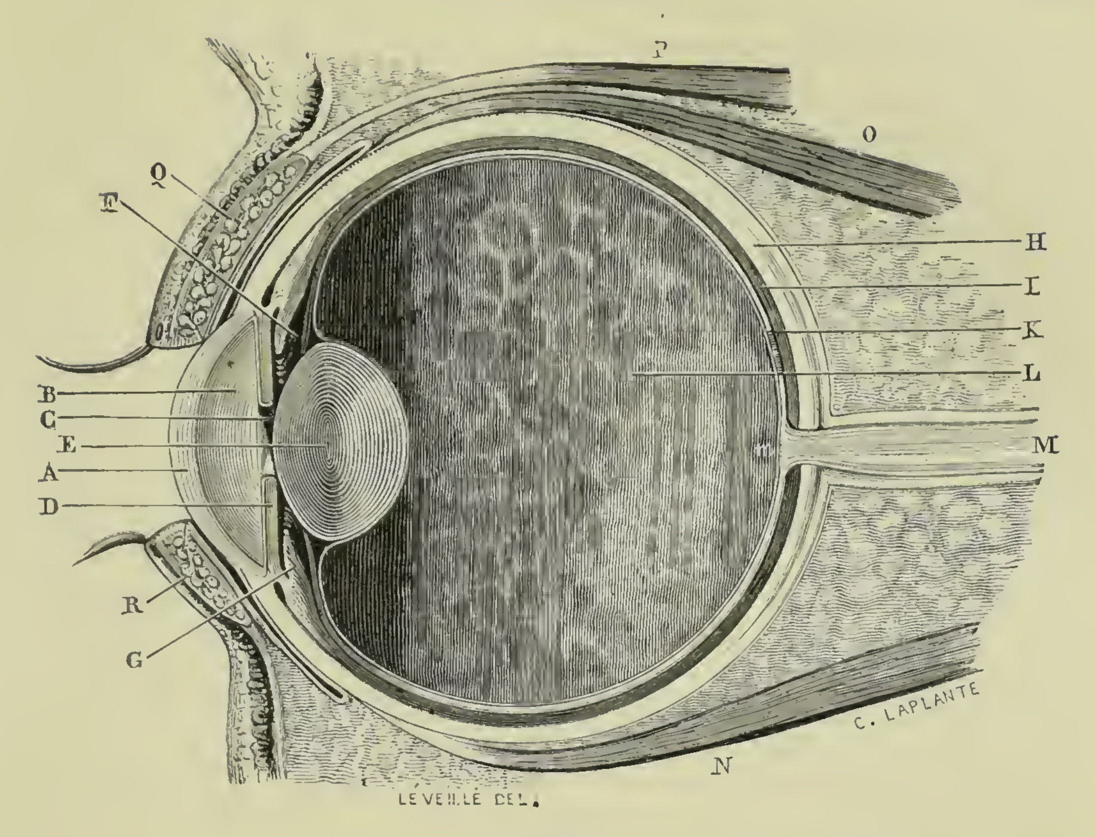


Fig. 61.

transparente, qu'on appelle la *capsule du cristallin.* Toute la masse du cristallin est constituée par des fibres microscopiques de section hexagonale formant des couches dont la disposition est peu connue, mais qui ont pour effet de donner au cristallin une certaine élasticité, tout en assurant la permanence de la forme primitive lorsque les actions qui tendent à la modifier viennent à cesser.

Le cristallin se comporte comme un milieu biréfringent; placé entre deux tourmalines ou deux prismes de Nicol, il présente la croix et les anneaux des cristaux uniaxes taillés perpendiculairement à leur axe optique.

La courbure du cristallin n'est pas la même sur ses deux faces. D'après M. Krause (1) la surface antérieure se rapprocherait de celle d'un ellipsoïde de révolution aplati, et sa surface postérieure serait celle d'un paraboloïde de révolution.

Tous les organes que l'on vient de décrire partagent l'œil en deux cavités bien distinctes : la première, comprise entre la cornée transparente A et la surface antérieure du cristallin, la seconde entre la surface postérieure du cristallin et la membrane hyaloïde.

(1) *Die brechungs indices,* etc... Hanovre, 1855.— Helmholtz, *Optique physiolog.*, p. 110.

Le premier de ces espaces, que l'on appelait autrefois *chambre antérieure* de l'œil, est rempli d'un liquide qui n'est autre chose que de l'eau renfermant seulement 2 pour 100 de sel marin et quelques matières organiques, et dont l'indice de réfraction diffère très-peu de celui de l'eau; ce liquide est l'*humeur aqueuse*.

L'espace enveloppé par la membrane hyaloïde est rempli par le *corps vitré*, sorte de masse de consistance gélatineuse, formée d'une partie fluide se rapprochant de la composition de l'humeur aqueuse et d'une matière mucilagineuse; on ne sait si cette dernière matière n'est pas disposée sous forme de filets irréguliers ou de membranes.

D'après M. Listing (1) on pourrait regarder les indices de réfraction de l'humeur aqueuse et du corps vitré comme égaux à 1,337, et celui du cristallin à 1,454. On voit d'après cela que le cristallin est plus réfringent que le milieu qui l'entoure, et il contribue à augmenter la convergence des faisceaux lumineux déterminée par leur première rencontre avec la surface convexe de la cornée.

L'œil des vertébrés fonctionne donc comme une véritable chambre noire, assimilable à celles que l'on met en usage pour la fixation des images par la photographie. Le système de la cornée, du cristallin et des liquides de l'œil, constitue un objectif composé, qui donne sur le fond de l'œil occupé par la rétine, des images réduites et renversées des objets lumineux extérieurs.

On sait qu'étant donné un système optique convergent, les images d'objets situés à des distances diverses de ce système se forment à des distances différentes; si donc certains objets sont tellement placés que leur image se produise nettement sur la rétine, des objets situés plus loin ou plus près donneront des images confuses; on sait cependant qu'il nous est possible de voir distinctement des objets situés à des distances très-différentes, mais l'expérience journalière montre que leur perception distincte ne peut être simultanée, et qu'il faut que l'œil s'*accommode* à la distance de l'objet que l'on veut examiner.

Cette accommodation de l'œil est une opération instinctive; on a été pendant longtemps réduit à des conjectures sur les modifications que subissait l'appareil oculaire pendant l'accommodation; mais depuis les travaux de M. Helmholtz sur ce sujet (2), on peut regarder comme certain que la courbure des deux surfaces du cristallin varie de telle

(1) *Beitrag zur physiologischen optik*. Gottingue, 1845.
(2) Helmholtz, ouvrage déjà cité, page 121 et suiv.

sorte que cette courbure diminue pour l'accommodation à de grandes distances et augmente pour les petites. On ne peut d'ailleurs rien préciser sur le mécanisme qui détermine ces changements de courbure, mais il n'y a guère que le muscle ciliaire à l'action duquel on puisse les attribuer. Des expériences précises ont montré que, contrairement à une opinion souvent émise, il n'y avait pendant l'accommodation aucune variation dans la longueur de l'axe oculaire.

L'iris contribue d'une manière accessoire à l'accommodation ; l'ouverture de la pupille se resserre dans l'accommodation pour les objets rapprochés, s'élargit dans celle pour les objets éloignés. Il est probable que le retrécissement de la pupille dans la vision des objets rapprochés a pour objet d'empêcher les aberrations produites par des rayons s'écartant trop de l'axe optique.

§ 2. *Absorption, diffusion et transformation des différents rayons par les milieux de l'œil.*

L'humeur aqueuse et le corps vitré, qui sont de l'eau presque pure, absorbent en très-grande proportion les rayons calorifiques obscurs ou faiblement lumineux. D'après M. Cima (1) le cristallin laisserait passer 13 pour 100, le corps vitré 9 pour 100 et l'œil entier également 9 pour 100 de la partie calorifique du rayonnement d'une lampe Locatelli.

MM. Janssen (2) et Frantz (3) ont trouvé que l'œil présentait, au point de vue de l'absorption de la chaleur, des propriétés sensiblement égales à celles de l'eau. Seulement, d'après M. Frantz, le pouvoir absorbant de la cornée et du cristallin, pour les rayons rouges, serait un peu plus considérable que celui de l'eau.

M. Tyndall (4) a pu, avec des précautions particulières sans lesquelles l'expérience pourrait être dangereuse, admettre dans son œil un faisceau concentré de rayons provenant des charbons incandescents d'une lampe électrique, rayons qui étaient dépouillés de toute la partie lumineuse par leur passage à travers une dissolution d'iode dans le sulfure de carbone ; dans ces conditions, il n'éprouva aucune sensation de cha-

(1) *Sul potere degli umori dell'occhio*, Turin (1852).
(2) *Ann. de chimie et de physique*, 3e série, t. LX, p. 61 (1860).
(3) *Ann. de Poggend.*, t. CXV, p. 266, 1862. — *Archives des sciences physiques de Genève*, t. XVI, p. 140 (1863).
(4) Tyndall, *Sur la radiation* (1865). — *Philos. Transact.*, t. CLVI (1866).

leur au fond de l'œil. Il n'en était pas de même pour les paupières si le faisceau venait à les rencontrer. Une lame de platine platinée, mise à la place occupée par l'œil, fut portée en un instant au rouge vif : ce résultat montre que l'on doit prendre les précautions les plus grandes pour répéter de telles expériences.

Les rayons ultra-violets aussi sont absorbables par les milieux de l'œil, mais en beaucoup moins grande proportion que les rayons infra-rouges. D'après MM. Brücke, Donders, Rees, la lumière ultra-violette qui a traversé un œil de bœuf produit encore la phosphorescence de la solution de bisulfate de quinine, et impressionne les substances photographiques. D'après M. Brücke (1) c'est surtout le cristallin qui jouit de la propriété d'absorber les rayons ultra-violets.

On peut d'ailleurs reconnaître, même sur le vivant, que la cornée et surtout le cristallin présentent une phosphorescence à durée plus ou moins longue. (Voir tome Ier, page 319.) D'après M. Helmholtz la rétine elle-même est phosphorescente à un degré un peu moindre que le papier, la toile ou l'ivoire. Pour reconnaître ces faibles degrés de phosphorescence, il faut placer la substance dans la partie ultra-violette d'un spectre bien épuré produit par des lentilles et un prisme en quartz, et les examiner au travers d'un verre d'urane, qui puisse absorber la lumière renvoyée simplement par diffusion, pour ne laisser arriver à l'œil que celle dont le degré de réfrangibilité a diminué par la transformation propre aux substances phosphorescentes.

Il résulte de là que bien que les milieux de l'œil absorbent en grande partie les rayons infra-rouges et en plus faible proportion les rayons ultra-violets, il pourrait en arriver encore assez à la rétine pour qu'elle pût les percevoir si elle était aussi sensible à leur impression qu'à celle des autres rayons colorés ; si la rétine a son action ordinairement limitée aux derniers rayons visibles rouges et violets, c'est-à-dire en deçà de la raie A et un peu au-delà de H, il faut qu'elle ne soit surtout sensible qu'entre ces limites extrêmes de réfrangibilité et qu'elle ne soit pas également impressionnée par les vibrations éthérées quelle que soit leur longueur d'onde. Quant à la vision des rayons situés au-delà du violet et dans les circonstances qui ont été rapportées tome Ier, page 141, il est possible qu'elle n'ait pas lieu habituellement en raison du peu d'intensité

(1) Brücke, *Muller's Archiv. für Anat. und Physiol.*, 1845-46. — Poggendorf, *Annalen*, t. LXV, pag. 593 ; t. LXIX, pag. 549.

de ces rayons ; on reviendra du reste plus loin sur ce sujet, page 340. On voit néanmoins que la rétine se trouve dans des conditions analogues à celles des différentes matières impressionnables, soit par phosphorescence, soit par action chimique, puisque l'on a vu que chacune d'elles était sensible entre des limites particulières de réfrangibilité.

Les milieux de l'œil peuvent d'ailleurs s'illuminer par les rayons qui n'éprouvent pas d'absorption, et cet effet est produit par une diffusion latérale ; en outre, la rétine elle-même peut réfléchir une certaine quantité de lumière qui lui est ensuite renvoyée par les autres parties de l'œil, et il en résulte que lorsqu'une grande quantité de lumière pénètre dans l'organe, il s'en répand toujours des quantités sensibles sur le champ de la vision. Entre autres expériences propres à mettre ce fait en évidence on peut citer celle-ci : « Si l'on voit, dit M. Helmholtz (1), une flamme lu-« mineuse en avant d'un champ très-obscur, par exemple devant l'ou-« verture d'une porte qui donne dans une chambre tout à fait sombre, « la lumière paraît entourée d'un nuage blanchâtre dont la plus grande « intensité appartient aux points où il touche la flamme. On remarque « mieux encore ce reflet lumineux lorsqu'on amène un petit corps opaque « entre l'œil et la lumière, de manière à masquer la flamme : aussitôt le « brouillard lumineux disparaît, et le fond reprend la coloration noire « qui lui est propre. Si la lumière est colorée, le nuage lumineux co-« loré diffusé présente naturellement la même couleur. Je crois que, « dans ce cas encore, le nuage lumineux provient certainement de la « diffusion de la lumière objective, car la distribution de la lumière « diffuse ne diffère pas de celle que donnerait, dans les mêmes condi-« tions, un système de lentilles de verre. Pour la lumière bleue, on voit « encore s'ajouter la lumière blanc bleuâtre diffusée par la fluorescence « du cristallin, et qui s'étend également sur tout le fond de l'œil. »

Cette quantité de lumière diffusée ainsi par diverses causes peut varier avec les individus, et surtout avec l'état pathologique qui peut modifier la nature des milieux, au point de vue, soit de leur limpidité, soit de leur propriété de donner, par phosphorescence, des rayons d'une autre longueur d'onde que celle des rayons incidents.

En résumé, on voit qu'en dehors des images que forment les rayons directs, la rétine peut recevoir de la lumière diffuse provenant d'une imperfection de la partie pigmentaire de la choroïde (albinisme), des ré-

(1) *Optique physiologique*, page 526.

flexions qui ont lieu aux changements de milieux, de la diffusion dans les milieux plus ou moins troubles, enfin de la diffusion par phosphorescence.

§ 3. *Défaut d'achromatisme de l'œil.*

Les rayons de diverses réfrangibilités dont se compose un faisceau de lumière blanche ne suivent pas le même chemin dans l'intérieur de l'œil; pour que cela eût lieu il faudrait que les milieux traversés présentassent des dispersions ayant des différences convenables; or on sait que les différentes parties de l'œil sont, sous le rapport de leurs propriétés optiques, presque identiques à de l'eau pure. Les choses se passent donc pour l'œil comme pour les lentilles formées d'une seule substance réfringente: des rayons de lumière blanche émis par un même point lumineux donnent, après leur passage dans la lentille, des foyers distincts pour les rayons des diverses réfrangibilités. Ces foyers sont d'autant plus rapprochés de la lentille qu'ils appartiennent à des rayons plus réfrangibles. Il arrivera donc que si on regarde un point lumineux, la rétine pourra, pour une certaine accommodation de l'œil, recevoir l'impression produite par des cercles superposés de différentes couleurs; on verra une image centrale blanche entourée de cercles de diffusion de diverses teintes parmi lesquelles domineront le rouge et le violet. L'accommodation sera aussi parfaite que possible lorsque les cercles de diffusion des couleurs rouge et violette se trouveront égaux. C'est ainsi qu'à notre insu les choses se passent dans la plupart des cas; aussi a-t-on longtemps regardé comme une vérité évidente à priori que l'œil était achromatique; c'était l'opinion d'Euler, entre autres. On conçoit cependant que les circonstances qui permettent cette accommodation moyenne ne se présenteront pas toujours; par exemple si on accommode l'œil pour voir un certain objet médiocrement lumineux et que dans une direction peu différente et à une autre distance il s'en rencontre un autre assez notablement éclairé, l'image de celui-ci apparaîtra bordée de franges irisées.

L'achromatisme de l'œil fut d'abord révoqué en doute par Young (1), qui trouva que son optomètre donnait la sensation du rouge et du bleu en deçà et au delà de la distance de vision distincte.

Wollaston (2) remarqua qu'en regardant un point lumineux au travers

(1) *Philosophical Transactions*, t. LXXIX, p. 258.
(2) Id., t. LXXXI, 1re partie, p. 50 (1801.)

d'un prisme de façon à donner lieu à une spectre linéaire, il était impossible de voir nettement à la fois les deux extrémités de ce spectre.

Arago (1) varia de différentes manières l'expérience de Wollaston; il reconnut que pour voir nettement un astre dans une lunette il fallait enfoncer l'oculaire de quantités différentes lorsqu'on interposait entre l'œil et la lunette des verres diversement colorés.

C'est en éclairant des fils fins par des lumières monochromatiques que divers observateurs, Fraunhofer et Matthiessen, entre autres, ont cherché à mesurer la distance des foyers formés par les différentes couleurs. Le procédé employé par M. Helmholtz (2) pour ces évaluations consiste à éclairer, au moyen de la lumière des différentes couleurs séparées par un prisme, une très-petite ouverture pratiquée dans un écran obscur, et à chercher la plus grande distance à laquelle l'œil peut la voir sous forme d'un point lumineux. Ce physicien a trouvé ainsi que la plus grande distance visuelle de son œil étant de 2 mètres $\frac{6}{10}$ environ dans la lumière rouge, elle n'était plus que de 50 centimètres dans la lumière violette, et qu'elle descendait au-dessous de 20 centimètres pour les rayons ultra-violets les plus réfrangibles de la lumière solaire. Pour un œil accommodé sur l'infini, la différence des distances focales oculaires correspondantes aux rayons rouges et violets est d'environ $0^{mm},6$.

Quand on observe un petit orifice éclairé par un mélange de rayons rouges et violets (tel que le mélange que laissent passer certains verres d'un bleu foncé colorés par le cobalt), on observe des apparences diverses qui s'expliquent par la différence des accommodations relatives aux différentes couleurs. Si l'œil est accommodé pour les rayons rouges, on voit une image rouge entourée d'une auréole violette; le contraire a lieu lorsque l'œil est accommodé pour les rayons violets; enfin on peut trouver une accommodation telle que l'image de l'orifice paraisse nette et elle possède alors la teinte composée qui convient au mélange des couleurs employées.

M. Le Roux (3) a fait un autre usage de l'éclairement bichromatique d'un petit orifice pour démontrer, par une expérience tout à fait objective, que les faisceaux de rayons de réfrangibilités différentes suivent dans l'œil des chemins différents.

On sait que si sur une lentille non achromatique AB (fig. 62) on fait

(1) Vallée, *Théorie de l'œil*, Paris, 1844, Ire part., p. 332.
(2) *Optique physiologique*, p. 173.
(3) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, tome LXVI, p. 173.

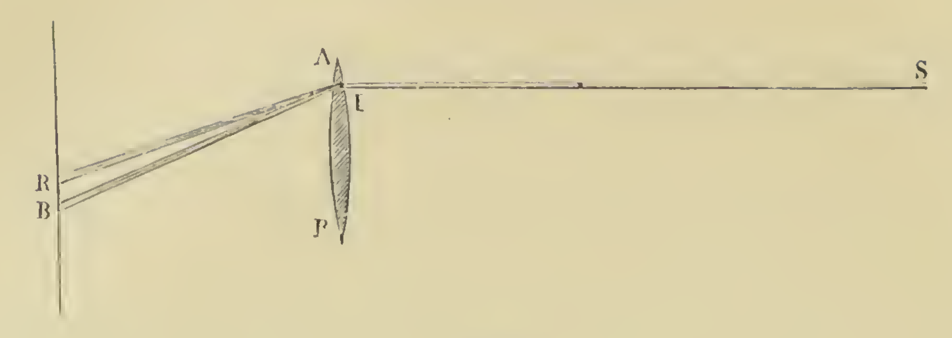


Fig. 62.

tomber un pinceau lumineux SI, parallèle ou à peu près à l'axe de figure de cette lentille, ce pinceau supposé homogène sera d'autant plus dévié de sa direction qu'il rencontrera la lentille en un point plus éloigné de son centre de figure. Si ce pinceau, au lieu d'être homogène, est composé de deux espèces de rayons, le rouge et le bleu par exemple, les rayons de ces deux couleurs seront séparés l'un de l'autre et donneront lieu à deux pinceaux émergents dont l'intersection avec un écran fournira deux images, l'une bleue, l'autre rouge. Un milieu réfringent terminé par une seule surface courbe, et c'est à très-peu près le cas de l'œil, produirait le même effet.

Une manière très-simple de soumettre à cette épreuve le système convergent de l'œil consiste à regarder le soleil à travers un petit orifice *t* de quelques dixièmes de millimètre, devant lequel on place un verre bleu-violet BB' (fig. 63) qui laisse passer en quantité à peu près égales les

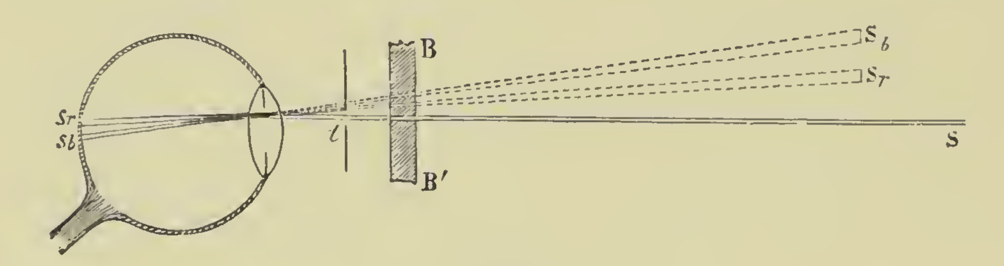


Fig. 63.

rayons rouges et bleus. On n'admet ainsi dans l'œil qu'un faisceau de lumière très-étroit; s'il y pénètre par la partie centrale de l'ouverture de la pupille, on ne perçoit qu'une seule image du soleil qui est alors colorée de la teinte du verre employé; mais si on déplace l'œil latéralement dans quelque sens que ce soit, cette image se dédouble et au lieu d'un seul disque on en aperçoit deux, l'un rouge S_r, l'autre bleu S_b, d'autant plus séparés que le faisceau lumineux pénètre dans l'œil plus loin du centre de la pupille. Le sens du déplacement des rayons est tel que

l'indique la figure, et concorde avec celui que fait prévoir la réfrangibilité des rayons.

Si on supprimait la partie supérieure de l'écran à l'endroit de l'orifice *t*, cela ne changerait rien aux circonstances principales du phénomène ; seulement le faisceau lumineux, au lieu d'être limité en haut et en bas par les bords de l'orifice, le serait en haut par la pupille et en bas par le bord de l'écran. On peut donc dire que les apparences de dispersion oculaire qui viennent d'être fournies par un petit orifice, pourront l'être par le bord d'un écran placé convenablement devant l'œil.

Brewster et d'autres physiciens avant et après lui ont fait une expérience de ce genre (1) en regardant le fond éclairé du ciel, et en mettant un doigt devant l'œil; lorsque les circonstances d'éclairement sont favorables, on aperçoit ainsi une sorte de spectre plus ou moins nettement dessiné.

M. Le Roux a employé encore une autre disposition qui rend l'expérience indiquée ci-dessus plus facile à répéter et plus nette. Au lieu de regarder le soleil à travers un petit orifice *t* on peut simplement regarder cet orifice en l'éclairant au moyen de la lumière solaire réduite au rouge et au bleu par l'interposition d'un verre convenable. Mais il faut placer en avant de l'orifice un oculaire qui empêche le faisceau de s'élargir avant de pénétrer dans l'œil. Grâce à cette disposition, on peut voir les deux images de l'ouverture entièrement séparées l'une de l'autre.

La figure 64 représentée ci-contre rend compte de la marche des

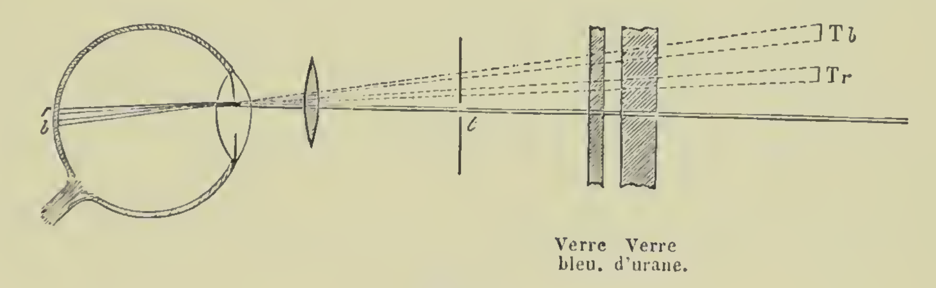


Fig. 64.

rayons lumineux; T_b et T_r sont les images virtuelles dont l'œil perçoit la sensation.

L'effet de séparation est d'ailleurs d'autant plus marqué que le faisceau lumineux pénètre dans l'œil plus excentriquement, et par conséquent que la pupille est plus dilatée. On facilite cette dilatation en

(1) Voir pour le détail de ces expériences : Trouessart, *Recherches sur quelques phénomènes de la vision;* Brest, 1854.

s'entourant la tête d'une étoffe noire qui empêche la lumière de pénétrer latéralement dans l'œil.

Il y a avantage à placer, comme la figure l'indique, en avant du verre bleu, un verre d'urane d'au moins un centimètre d'épaisseur. Ce verre absorbe les rayons ultra-violets que le verre bleu laisse passer, et qui, par l'illumination qu'ils produisent dans l'œil, troubleraient l'observation.

§ 4. *Appareils destinés à l'étude de l'œil. Ophthalmoscopes. — Effets entoptiques.*

La possibilité d'observer le fond de l'œil paraît avoir été entrevue depuis longtemps par divers observateurs ; mais c'est M. Helmholtz qui a le premier résolu la question et doté les sciences physiques et médicales d'un nouveau moyen d'exploration dont les résultats ont été déjà très-féconds. Les appareils qui permettent d'observer sur le vivant l'intérieur de l'œil et surtout la surface de la rétine ont été nommés ophthalmoscopes; leurs dispositions ont déjà beaucoup varié ; nous nous contenterons d'indiquer ici les principes sur lesquels ils sont fondés et nous ne décrirons que les plus usités (1).

Le système optique de l'œil humain peut être considéré comme équivalant à une lentille convergente donnant sur la rétine l'image nette d'un objet extérieur si cet œil est accommodé pour voir distinctement l'objet. D'après le principe de la marche inverse des rayons, si l'image qui se forme au fond de l'œil était remplacée par un objet lumineux, ce même système optique en donnerait au dehors une image considérablement agrandie. Mais au fond de l'œil se trouvent la rétine et les divers organes qui l'accompagnent; si nous les supposons suffisamment éclairés, ils donneront au dehors une image, et un observateur se plaçant à une distance de cette image égale à la distance de la vision distincte percevra une image renversée et agrandie des organes qui occupent le fond de l'œil.

C'est là l'ophthalmoscopie naturelle; malheureusement elle est à peu près impossible à pratiquer, à cause du peu d'intensité de l'image des parties en question, de l'exiguïté du champ et surtout de cette condition difficile à remplir que l'œil observé doit rester toujours semblablement accommodé. On peut de deux manières différentes modifier ces

(1) Helmholtz, ouvrage déjà cité, page 239.

conditions de façon à produire des images de la rétine, soit réelles, soit virtuelles, plus commodes à observer :

Quand on place près de l'œil observé une lentille convexe de quelques centimètres de foyer, comme le représente la figure 65, on aug-

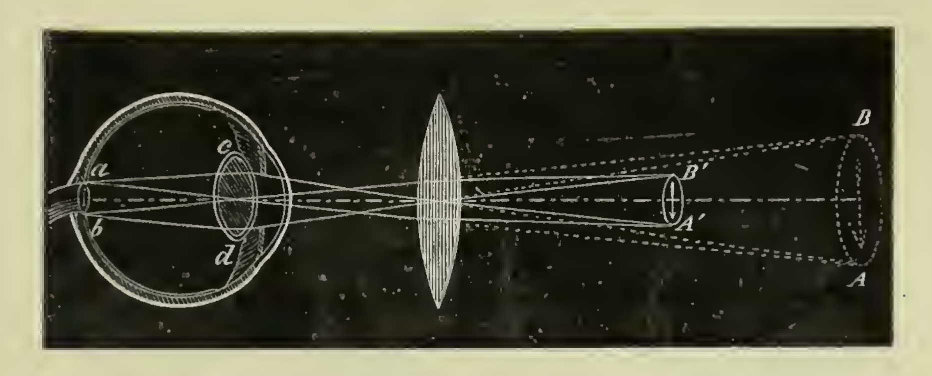


Fig. 65.

mente la convergence du système optique de l'œil, de manière à rapprocher en A′ B′ l'image renversée *ab* du fond de l'œil, qui sans cette interposition se serait formée en A B. L'observateur vient ensuite examiner à la loupe cette image A′ B′ comme on examine les images formées au foyer de l'objectif d'une lunette ou d'un microscope.

Si, au lieu d'une lentille convexe, on place en avant de l'œil observé une lentille concave, on a, dans ce cas, une image virtuelle qui a l'avantage d'être droite, car la lentille concave se combine avec le système optique de l'œil observé, de façon à faire l'office d'une loupe composée de telle sorte que la rétine peut se peindre virtuellement à la distance de la vision distincte de l'observateur.

Quelque procédé que l'on emploie, on est gêné par la pupille de l'œil observé, et lorsqu'on veut explorer la rétine sur une surface très-étendue on est obligé d'avoir recours à la dilatation artificielle de la pupille au moyen de l'atropine.

Dans l'un ou l'autre des systèmes indiqués une des conditions les plus importantes à remplir est celle d'un bon éclairage. L'éclairage direct, qui consiste à placer une lumière dans le voisinage de l'œil observé, en la cachant par un écran à l'œil de l'observateur, est le plus souvent impossible à réaliser. Le mieux est d'amener dans l'œil la lumière provenant d'une source placée en avant de l'observateur; on l'y dirige par un système convenable de lentilles et par un miroir percé d'un orifice par lequel l'observateur regarde; cette disposition est ana-

logue à celle du miroir percé de Lieberkühn dont on munit les microscopes pour éclairer la surface des objets opaques.

La figure 66 montre un éclairage disposé pour l'observation de l'i-

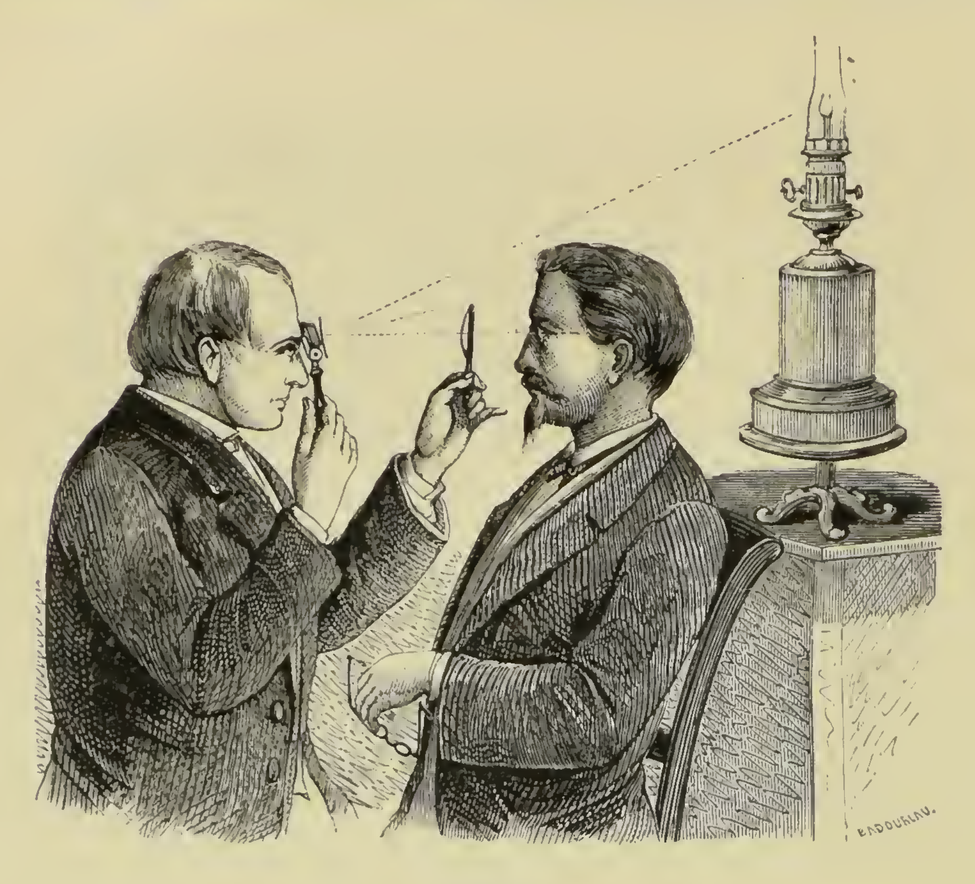


Fig. 66.

mage réelle renversée. La lumière provient d'une lampe placée derrière la tête de la personne que l'on examine; elle est dirigée convenablement au moyen d'un miroir portant une ouverture par laquelle regarde l'observateur. Quelquefois la lampe est placée latéralement.

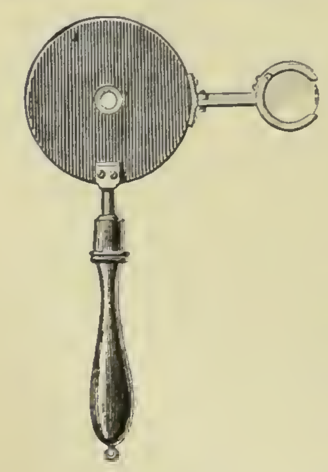
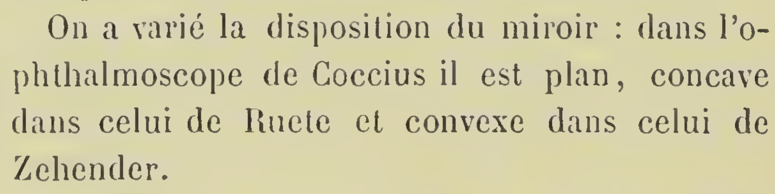


Fig. 67.



On a varié la disposition du miroir : dans l'ophthalmoscope de Coccius il est plan, concave dans celui de Ruete et convexe dans celui de Zehender.

Parmi les ophthalmoscopes on distingue les appareils à main et les appareils fixes. La fig. 67 représente un ophtalmoscope à main employé par M. Desmares et d'un fréquent usage. Il se compose d'un miroir concave en verre étamé, en argent ou en acier; ce miroir, fixé à un manche, a une distance focale de 20 à 25 centimètres et est

percé à son centre d'un orifice de 3 millimètres de diamètre environ. Il est accompagné d'un ou de plusieurs verres concaves et convexes ayant 24, 15 ou 20 pouces de distance focale, suivant que l'observateur est myope ou presbyte; ces verres peuvent se placer dans une pièce à charnière vue sur le côté, pouvant se rabattre sur l'appareil. La lentille convexe, que l'on approche de l'œil observé, doit avoir 2 pouces $\frac{1}{4}$ environ de distance focale.

La fig. 68 représente un ophthalcosmope construit par M. A. Che-

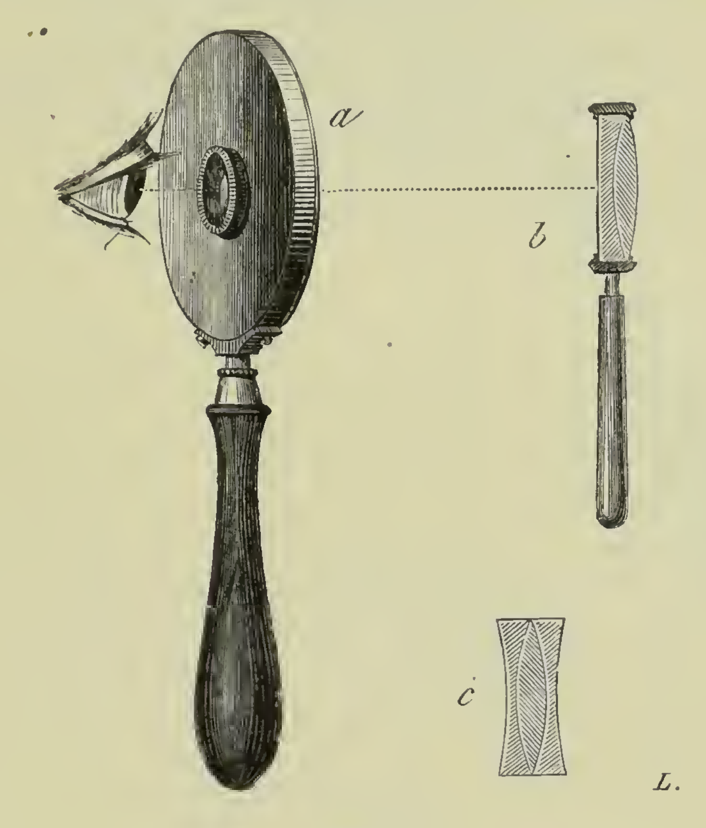


Fig. 68.

valier à l'aide de lentilles achromatiques. *a* est l'appareil composé d'un miroir concave et d'une lentille oculaire; *b* est la lentille objective qui modifie dans le sens convenable l'image du fond de la rétine que tend à fournir le système optique de l'œil, comme on l'a expliqué ci-dessus. Cette image est examinée au moyen d'un oculaire concave, dont on voit la coupe en *c*, lequel forme avec l'objectif *b* comme une lunette de Galilée.

Quand on examine ainsi les yeux normaux avec un ophthalmoscope, le fond de l'œil paraît rouge; seule, la partie où pénètre le nerf optique, et que l'on nomme la *papille*, semble blanc clair. Sur le fond rouge on

distingue les ramifications des vaisseaux de la rétine, vaisseaux dont les troncs principaux apparaissent au milieu du nerf optique ; les artères se reconnaissent à leur couleur rouge claire. Souvent, surtout dans les parties latérales, on reconnaît les vaisseaux de la choroïde. Ce sont les changements qui se produisent dans l'image ainsi observée qui peuvent guider les praticiens pour le traitement de certaines maladies des yeux.

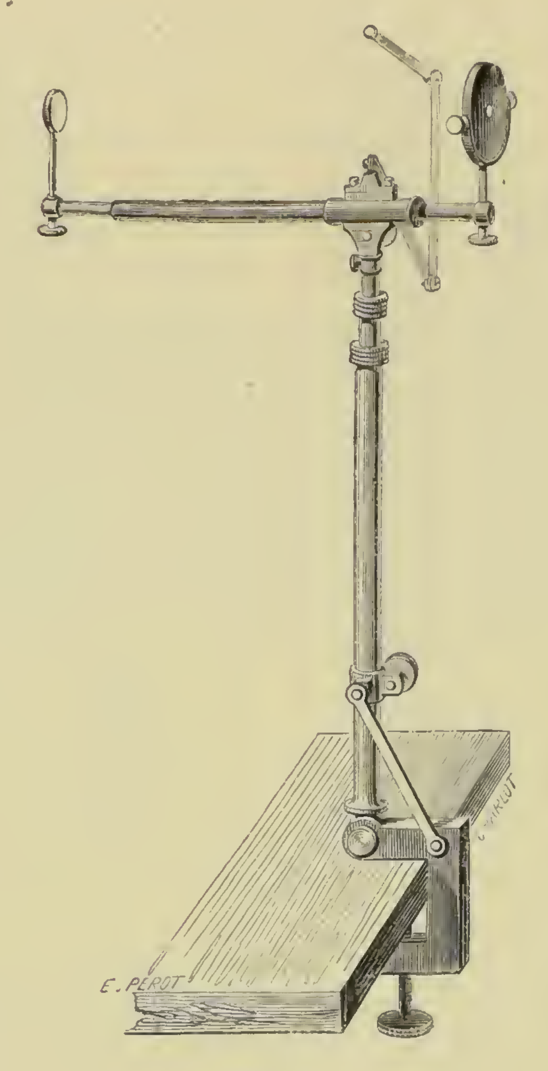


Fig. 69.

Les appareils simples à main ne sont pas les seuls qui soient employés pour l'étude des parties intérieures de l'œil : quelquefois, quand il s'agit d'un examen un peu prolongé, on se sert d'ophthalmoscopes fixes ; la fig. 69 donne une disposition d'un appareil de ce genre. La lentille objective située à gauche se place près de l'œil observé ; l'oculaire réuni au miroir est situé à droite, et une tige articulée terminée par

une sphère, sert à diriger le regard de la personne que l'on examine.

M. Giraud-Teulon (1) a fait usage d'un ophthalmoscope binoculaire stéréoscopique, donnant la sensation de relief et construit par M. Nachet, lequel a utilisé le système de prismes à réflexion totale qu'il avait appliqué au microscope binoculaire. Cet appareil est représenté fig. 70. La partie

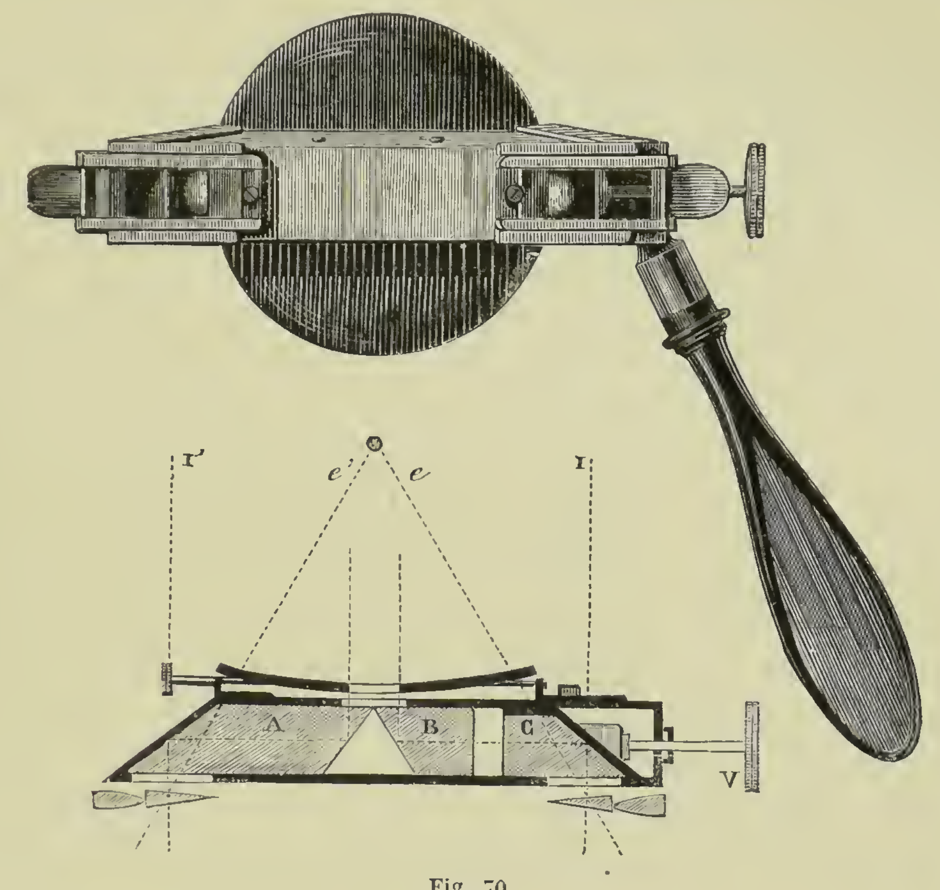


Fig. 70.

supérieure représente l'appareil, et la partie inférieure sa coupe théorique. Un des deux prismes A est fixe; l'autre est divisé en deux parties, l'une fixe B, l'autre C mobile au moyen d'une vis V.

Les deux yeux visent par des ouvertures les deux images du fond de l'œil après deux réflexions totales qui les feraient paraître en I et I' sans l'interposition des demi-lentilles; celles-ci, par un effet de réfraction, comme dans le stéréoscope, font coïncider ces images en *ee'*; on a donc en *e e'* l'image du fond de l'œil avec la sensation de relief due à la vision binoculaire simultanée.

(1) Giraud-Teulon, *Vision binoculaire*, 1861. — Zander, *l'Ophthalmoscope*.

Dans son ophthalmoscope, M. Helmholtz emploie, comme éclaireur, au lieu d'un miroir un certain nombre de lames de verre superposées. « Quand on examine, dit-il (1), des yeux normaux sans employer l'atro- « pine, on pourrait obtenir la même intensité par l'un ou l'autre procédé « d'éclairage, si les pupilles étaient immobiles. Mais le miroir étamé en- « voie, en somme, plus de lumière dans l'œil observé, l'éblouit davantage, « ce qui cause une contraction plus considérable de la pupille, de telle « sorte que, dans ces conditions, le miroir non étamé peut donner un « plus grand champ visuel et une plus grande intensité. En outre, il « éclaire d'une manière uniforme la portion de rétine que l'on exa- « mine, tandis qu'avec le miroir percé, l'image de diffusion du trou « rend l'éclairage irrégulier. Enfin le reflet cornéen est moins gênant avec « le miroir non étamé, parce que la lumière réfléchie par le miroir « est plus ou moins polarisée, et qu'étant renvoyée par la cornée sans « changement dans sa polarisation, elle ne traverse qu'en faible propor- « tion les lames de verre..... Cet ophthalmoscope à main, le plus ancien- « nement décrit, est celui dont l'usage est préférable. Un œil sain peut « supporter, pendant des heures sans en être ébloui, l'éclairage que « donne ce miroir. C'est ainsi qu'il m'est souvent arrivé de montrer « successivement, avec cet instrument, ma rétine à vingt étudiants, « sans en éprouver d'incommodité, tandis que l'œil ne peut guère sup- « porter pendant plus de cinq minutes l'éclairage au moyen des miroirs « étamés sans être fortement ébloui. Aussi je préfère ce miroir aux autres « pour la plupart des expériences physiologiques. Pour les oculistes, « au contraire, il est plus avantageux d'avoir le champ visuel très- « étendu et fortement éclairé, en sacrifiant le grossissement; aussi em- « ploient-ils, le plus souvent, des miroirs étamés percés et des lentilles « convexes. »

On a imaginé beaucoup d'autres formes d'appareils pour lesquels on peut consulter les ouvrages spéciaux publiés sur ce sujet (2). D'après des dispositions particulières, il est même possible de voir soi-même les différentes parties de la rétine, et l'on forme ainsi ce que l'on nomme l'*autophthalmoscope* (3).

Effets entoptiques. — Une disposition assez simple permet d'étudier sur

(1) *Optique physiologique*, page 248.
(2) Zander, *l'Ophthalmoscope.* — Follin, *Leçons sur l'exploration de l'œil.* — Helmholtz, *Optique physiologique*, etc.
(3) Helmholtz, *Optique physiologique*, pages 253, 286.

soi-même, dans certaines circonstances, différents objets contenus dans le cristallin, l'humeur vitrée, etc., c'est-à-dire dans les diverses parties de l'œil situées en avant de la rétine; ces perceptions sont dites *entoptiques* (1). Pour les observer, on approche de l'œil, soit l'image d'une lumière éloignée se formant au foyer d'une petite lentille convergente, soit un petit bouton de métal bien poli qui reçoit la lumière du soleil ou celle d'une lampe, soit un écran de papier foncé ou de carton placé très-près de l'œil, et ne laissant passer la lumière qu'à travers une très-petite ouverture. La disposition la plus convenable consiste à employer une lentille convergente de grande ouverture et de petite distance focale; en avant de cette lentille et à quelque distance on dispose une lumière, ou on reçoit simplement la lumière des nuées; on place alors l'écran opaque percé d'une très-petite ouverture de façon à ce que l'image de la lumière vienne se faire sur cette ouverture qui laisse alors échapper un large cône de rayons divergents. En mettant l'œil très-près de l'ouverture de l'écran, cet œil voit à travers cette ouverture, la surface large et bien éclairée de la lentille sur laquelle se représentent avec une grande netteté les objets entoptiques que l'on veut étudier.

On voit d'abord les bords de l'iris, car le champ lumineux est limité par l'ombre de l'iris; on peut donc observer sur soi-même l'élargissement ou le retrécissement de ce diaphragme ainsi que les entailles, plis ou protubérances de ses bords. On peut distinguer des stries, des places claires dépendant des humeurs (larmes, secrétions des glandes palpébrales) qui recouvrent la cornée. On peut voir aussi des lignes uniformes provenant d'une déformation temporaire de la surface antérieure de la cornée, quand on a frotté ou pressé l'œil par l'intermédiaire de la paupière. Il est possible de reconnaître également par l'ombre qu'elles portent sur la rétine, des taches, des bandes, des lignes radiées que présente le cristallin, lesquelles existent toujours d'une manière plus ou moins marquée et surtout dans certains cas pathologiques. On reconnaît encore des formations mobiles dans le corps vitré et en particulier ce que l'on a nommé des *mouches volantes*. On peut enfin, en disposant convenablement les lentilles et l'écran, distinguer les vaisseaux de la rétine. M. Robert Houdin a indiqué des dispositions d'appareils simples qui permettent d'examiner facilement ces divers effets entoptiques (2).

(1) Helmholtz, *Optique physiologique*, p. 204.

(2) *Comptes-rendus de l'Acad. des sciences*, t. LXII, p. 617, et t. LXIII, p. 865. — Ro-

§ 5. *Lueur oculaire. — Sensibilité de diverses parties de la rétine; punctum cæcum, macula lutea. — Phosphènes.*

Lueur oculaire. — Il n'est peut-être personne qui n'ait remarqué que dans certaines conditions d'obscurité les yeux des chiens et surtout des chats brillent d'un éclat remarquable. On a longtemps cru que les yeux de ces animaux brillaient d'une lumière propre et que l'irritation ou d'autres impressions morales pouvaient développer à un degré plus marqué cette faculté. Prévost (1) paraît être le premier qui ait démontré expérimentalement que la condition nécessaire du phénomène était l'admission dans l'œil des animaux, d'une certaine quantité de lumière arrivant de derrière l'observateur. Ce ne peut donc être qu'un phénomène de réflexion, et l'éclat si frappant de cette lueur tient à l'effet du contraste, les animaux étant plongés dans l'obscurité. Il faut remarquer d'ailleurs que les animaux chez lesquels on observe le plus communément ces effets présentent deux circonstances particulières : d'abord une grande dilatabilité de la pupille, ce qui élargit le champ du phénomène, ensuite la présence au fond de l'œil d'une place dépourvue de pigment et recouverte de lamelles minces possédant à un haut degré la propriété de réfléchir la lumière.

L'œil humain peut aussi donner lieu à ces phénomènes, mais seulement dans quelques cas particuliers. Plusieurs observateurs, parmi lesquels MM. Brücke, Behr, etc., avaient observé cette lueur oculaire dans des cas de maladies rares, telles que des tumeurs du fond de l'œil ou d'aniridie. M. Helmholtz a donné le premier la solution complète de cette question, en montrant que l'œil humain normal pouvait donner lieu à l'observation d'une lueur analogue pourvu qu'il fût placé dans des conditions convenables; c'est même à ce propos qu'il imagina l'ophthalmoscope.

Ainsi qu'on l'a expliqué ci-dessus, si un œil est accommodé pour voir un objet lumineux, l'image formée sur la rétine sera elle-même un objet donnant une image qui viendra se superposer à l'objet lumineux lui-même. Notre œil n'étant pas lumineux, nous ne pouvons voir de lumière dans un œil qui regarde le nôtre, mais nous en verrions dans un

bert Houdin, note sur de nouveaux instruments propres à l'observation de divers organes de l'œil. Blois, 1867.

(1) *Bibliothèque Britannique* (1810), tome XLV.

œil fixant un point lumineux à très-peu près en ligne droite avec notre œil, parce que dans ce cas il peut arriver que notre œil intercepte une partie du faisceau de retour émané de l'œil observé. Mais il faut pour cela des conditions particulières qui ne peuvent généralement se produire que par suite d'une disposition spéciale.

Quant à la lumière rougeâtre qui caractérise l'ouverture de la pupille des albinos, elle provient de l'éclairement de la rétine par de la lumière qui a traversé la partie antérieure de la sclérotique de ces sujets dont la choroïde est dépourvue de pigment.

Punctum cæcum. — Les fibres qui constituent le nerf optique sont insensibles à l'action directe de la lumière; elles sont transparentes, car l'examen ophthalmoscopique permet de voir au travers de leur substance les vaisseaux artériels et veineux qui en occupent le centre que l'on nomme la papille du nerf optique, comme on l'a vu plus haut, et s'irradient avec lui sur la rétine; on reconnaît cependant que cette partie de l'organe de la vue est complétement insensible à la lumière. Elle forme au fond de l'œil une *tache aveugle* ou *punctum cæcum* dont la découverte est due à Mariotte.

Voici une manière très-simple de constater l'existence de cette région insensible à la lumière : on ferme l'œil gauche et on regarde à la distance de 25 à 30 centimètres la figure 71, en ayant soin de fixer la petite croix



Fig. 71.

et en plaçant l'œil droit à peu près perpendiculairement au-dessus de la croix; en variant un peu dans un sens ou dans l'autre, à droite ou à gauche, ou en avant ou en arrière, la position du livre, on en trouve une pour laquelle l'image du cercle blanc disparaît complétement; en deçà et au delà elle apparaît de nouveau. Il est bien entendu que pour que l'expérience réussisse, il faut avoir soin de ne pas cesser un seul instant

de fixer la petite croix; cette condition est nécessaire pour orienter l'œil d'une manière convenable, car on va voir que la région de la vision spécialement distincte correspond à une partie très-restreinte de la rétine.

Pour faire l'expérience avec l'œil gauche, il faudrait employer une figure symétrique de celle-ci.

On peut se rendre compte que dans cette circonstance l'image du cercle blanc vient bien se faire sur l'entrée du nerf optique : M. Donders a montré directement, au moyen de l'ophthalmoscope, l'insensibilité de cette région en y faisant tomber l'image d'une flamme qui ne produisait dans ce cas aucune sensation lumineuse chez le sujet soumis à l'expérience; il a pu donner ainsi la démonstration la plus directe que la tache aveugle correspondait bien à l'insertion du nerf optique lui-même et non pas seulement à celle des gros vaisseaux qui s'y trouvent. Enfin M. Coccius a montré qu'on pouvait faire cette même expérience sur soi-même.

Le diamètre moyen du *punctum cæcum* est d'environ $1^{mm},8$; son diamètre apparent horizontal est d'environ 6° en moyenne; mais d'un sujet à un autre il peut présenter des variations du simple au triple.

On peut se rendre compte de l'importance de la tache aveugle dans le champ visuel, en remarquant, comme le fait M. Helmholtz, que 11 pleines lunes pourraient s'y ranger à la file, et qu'à la distance de 2 mètres environ une figure humaine y peut disparaître.

On peut se demander comment il se fait que nous ne soyons pas gênés à chaque instant par la présence de cette tache aveugle? mais cette question est évidemment du domaine de la physiologie; on peut dire cependant que les conditions ordinaires de la vision étant l'emploi des deux yeux, les indications fournies par un de ces organes complètent celles de l'autre, et aussi que la véritable manière que nous employons pour prendre connaissance des objets qui se trouvent dans le champ visuel est de déplacer rapidement l'axe de fixation ou de maximum de netteté dans la vision, lequel correspond à la partie de la rétine à laquelle on donne le nom de *tache jaune* et dont il va être question.

Macula lutea ou *tache jaune.* — Dans la description de l'œil faite antérieurement page 302, fig. 61, on a déjà fait remarquer que très-près de l'insertion du nerf optique dans la rétine, et à peu près symétriquement par rapport à l'axe de figure de l'œil entre les lignes L et K, se trouvait une sorte de tache remarquable par sa coloration jaune; on ne l'a

jusqu'à présent observée que dans l'œil de l'homme et des singes.

Au centre de la tache jaune se trouve une petite dépression beaucoup plus transparente que les parties environnantes, qu'on appelle la *fovea centralis*. La tache jaune est composée d'une couche de fibres particulières qui rayonnent du centre de la *fovea centralis*.

Des mesures prises par différents observateurs donnent :

Diamètre horizontal de la tache jaune.	$2^{mm},25$ à $3^{mm},24$
— vertical.	$0^{mm},81$
Diamètre de la *fovea centralis*	$0^{mm},18$ à $0^{mm},22$.

La tache jaune est le lieu de la vision distincte ; fixer un objet de manière à en percevoir les détails, c'est diriger l'œil de façon que l'image de cet objet vienne se faire sur la tache jaune.

Lorsqu'au contraire l'image d'un objet tombe sur les parties latérales de la rétine, elle donne une sensation d'autant moins nettement définie qu'on s'éloigne davantage de la région de la *macula lutea*. C'est ce qu'on appelle la *vision indistincte*.

Phosphènes. — La rétine, au lieu d'être impressionnée par les vibrations lumineuses, peut être excitée mécaniquement, et il en résulte une sensation de lumière qui ne correspond à aucun éclairage objectif du champ visuel ; ainsi un coup subit donné sur l'œil produit une lueur répandue dans tout le champ de la vision, elle est souvent assez intense et passe comme un éclair. Au lieu d'un choc violent, si l'on vient à presser le globe de l'œil en un point voisin de l'orbite, il se produit une impression de lumière correspondant à la partie de la rétine qui a été comprimée. Tout autre mode d'excitation nerveuse, comme l'électricité, peut conduire à des résultats analogues. Ces sensations lumineuses dues à des causes différentes de l'excitation lumineuse, ces *phosphènes* comme on les appelle, sont très-variées et ont été étudiées par plusieurs physiologistes ; elles ont pu guider dans l'étude de certaines affections de l'œil.

On doit également rapporter à des effets de cette nature la lumière propre de la rétine, lumière blanchâtre, admise par les physiologistes et qui ne dépend d'aucune cause objective ; elle provient d'une excitation nerveuse interne, peut-être du mouvement du sang dans les vaisseaux qui tapissent cette partie de l'organe.

CHAPITRE II.

De la sensation lumineuse.

§ 1. *Variation de l'intensité de la sensation avec celle de l'intensité lumineuse.*

On doit distinguer dans les sensations leur *qualité* et leur *intensité*. Il ne saurait y avoir de commune mesure entre des quantités qui ne sont pas de même espèce, et on ne peut songer à comparer les intensités de deux lumières qu'autant qu'elles sont de même qualité, c'est-à-dire de même couleur.

La couleur d'une lumière simple est déterminée par sa longueur d'onde, c'est-à-dire par son nombre de vibrations pendant l'unité de temps, comme la hauteur d'un son est déterminée par le nombre des vibrations sonores. L'oreille peut reconnaître, après un exercice plus ou moins long, il est vrai, si deux sons simultanés ont la même hauteur; elle reconnaît beaucoup plus facilement le contraire si les deux sons se succèdent à un court intervalle. L'œil au contraire perçoit du premier coup des différences, même très-faibles, dans la coloration de deux champs éclairés juxtaposés; mais si les impressions sont séparées par un intervalle de temps si faible qu'il soit, ses jugements n'ont plus la même sûreté. Ainsi l'organe de l'ouïe peut acquérir par l'exercice assez de sensibilité pour reconnaître où l'on doit placer un son dans l'échelle musicale, mais l'œil classe difficilement une couleur isolée.

L'oreille ne peut guère juger de l'égalité d'intensité de deux sons simultanés de même hauteur; elle le peut s'ils se succèdent. L'œil au contraire ne peut comparer que des intensités coexistantes ou séparées par un très-faible intervalle de temps; l'évaluation isolée de l'intensité lui est impossible comme à l'oreille. Nous avons donc surtout la mémoire des sensations successives de l'oreille et celle des sensations simultanées de l'œil.

Il est probable que l'oreille n'intervient pas seule dans les jugements qui la concernent; à côté de cet organe il y en a un autre, le larynx, destiné à produire les sons et qui est sous l'empire de la volonté; aussi a-t-on remarqué que les personnes exercées à juger la hauteur d'une note de musique isolée opèrent en se la chantant intérieurement, de ma-

nière à la comparer avec d'autres notes qu'ils sont habitués à produire. Pour l'œil, qui paraît juger isolément des couleurs, il ne fait que de les comparer entre elles ou à la lumière dite *blanche*.

Dans la comparaison des hauteurs des sensations lumineuses, l'œil paraît l'emporter en sensibilité sur l'oreille quand cet organe compare des sons à des hauteurs diverses; car l'œil perçoit des différences de nuances correspondant à des rapports de nombres de vibrations qui échapperaient à l'oreille dans la comparaison des intervalles musicaux. Mais il faut remarquer que l'étendue des sons perceptibles comprend un grand nombre d'octaves, tandis que les longueurs d'onde des rayons qui impressionnent la rétine forment à peine une octave (1).

Quand on examine ce qui arrive dans la comparaison des intensités lumineuses, on reconnaît qu'étant donnés deux objets lumineux d'intensités différentes, si les instants de l'observation sont séparés par un intervalle de temps sensible, on ne peut que constater qu'il existe une inégalité, encore faut-il que celle-ci soit considérable. Cela ne doit pas surprendre d'ailleurs si on songe qu'il paraît y avoir pour chaque individu une valeur moyenne de l'intensité lumineuse pour laquelle l'organe visuel est particulièrement à l'aise; la contraction et la dilatation de la pupille ont précisément pour but de faire varier la quantité de lumière qui pénètre jusqu'à la rétine; il y a donc là dans la question des appréciations de l'intensité, résultant d'observations successives, un élément variable dépendant de mouvements involontaires.

Si ce que l'on vient de dire est vrai pour l'observation successive de champs visuels éclairés sur de très-grandes étendues, cela l'est encore plus pour celle de surfaces lumineuses très-restreintes, telles que les flammes, et dans ce cas le diamètre apparent des objets lumineux joue un rôle très important.

Dans la comparaison immédiate, au contraire, l'organe est nécessairement dans le même état; aussi peut-on distinguer facilement lorsque deux éclairements diffèrent de l'égalité, mais toujours sans qu'il soit possible d'assigner une valeur quelconque, même approchée, au rapport qui peut exister entre eux. Aussi, comme nous l'avons vu tome Ier, page 97, les plus anciennes méthodes photométriques sont-elles fondées sur la nécessité de ramener à l'égalité de sensation, par des modifications préliminaires appréciables, les effets de deux sources lumineuses sur la rétine.

(1) Voir tome Ier, page 147.

Soient 1 et $1 + \alpha$ les intensités de deux éclairements au moment où ils frappent la rétine, α peut encore conserver une certaine valeur lorsque l'œil se refuse à apprécier aucune différence entre ces intensités. L'expérience a montré que dans certaines limites cette quantité α, variable avec l'observateur, change peu avec la valeur absolue de l'éclairement pris pour unité, pourvu toutefois que les circonstances soient telles que l'œil fonctionne sans éprouver de fatigue soit par défaut d'intensité, soit au contraire par excès. Cette quantité α change avec les circonstances, elle varie de $\frac{1}{50}$ à $\frac{1}{150}$; ce dernier chiffre ne peut être atteint que dans des conditions exceptionnelles ; Bouguer pouvait distinguer $\frac{1}{64}$ de différence entre les intensités de deux lumières.

Dans certaines conditions de mouvement, Arago a trouvé que ce chiffre descendait à $\frac{1}{131}$. On peut voir ce qui a déjà été dit sur ce sujet, t. I[er], pages 99 et 173.

M. Fechner (1) a proposé, sous le nom de *loi psychophysique*, une relation entre l'intensité de la lumière et l'énergie de la sensation qu'elle produit, loi qui s'appliquerait aussi à des sensations d'un autre ordre. Cette loi est celle-ci : en appelant S et s les sensations produites par des intensités lumineuses H et h on aurait

$$S - s = \log \frac{H}{h}$$

au moins tant que les causes de perturbation ne sont pas prédominantes.

Les principes qui servent de point de départ à l'établissement de cette relation ne sont pas absolus ; voici comment on pourrait exposer les raisonnements qui y conduisent : les agents extérieurs (ici c'est la lumière) produisent des sensations, c'est-à-dire des effets sur les sens, puis le cerveau en communique la perception à notre être intelligent ; si on admet que la perception soit proportionnelle à la sensation et qu'en outre les différences de sensations qui cessent d'être perçues soient toujours du même degré de petitesse, en traduisant en langage algébrique ce fait que les plus petites différences perceptibles de la

(1) Voir Helmholtz. *Optique physiologique*, page 414.

sensation sont des fractions constantes ou à peu près de l'intensité, on a

$$dS = A \frac{dH}{H},$$

A étant une constante; cette relation intégrée conduit à l'expression ci-dessus indiquée.

Le fait expérimental c'est que $\frac{dH}{H}$, que l'on avait appelé plus haut α, est constant pour un même individu dans les mêmes circonstances, et l'hypothèse est que dS, différence de sensation qui cesse d'être perceptible, est constante.

Cette relation, qui suivant divers auteurs allemands s'appliquerait à d'autres sensations, telles que celle des sons, des efforts musculaires, etc., s'accorde assez bien avec le classement empirique des étoiles en divers ordres de grandeurs, les numéros des grandeurs s'accroissant sensiblement de quantités proportionnelles au logarithme de leur éclat photométrique.

Une semblable loi offrirait beaucoup d'intérêt au point de vue physique si on savait faire la part de la sensation, c'est-à-dire de l'effet immédiat sur le sens, et de la perception; malheureusement la science est encore loin de pouvoir le faire. D'ailleurs, l'effet de la constance approximative de la sensibilité relative peut s'expliquer simplement par l'effet de causes perturbatrices; il pourrait bien arriver en effet que la différence des sensations simultanées produites par deux intensités lumineuses différentes ne soit pas égale à la différence de ces sensations si on pouvait les évaluer successivement et isolément, et la loi de Fechner s'applique précisément aux sensations isolées. Pourrait-on dire, par exemple, que si une balance chargée de 100 gr. dans un plateau et de 100 gr. plus 1 milligramme dans un autre trébuche d'un angle de 1°, cet angle de 1° serait la différence des angles dont elle trébucherait si on mettait successivement dans le même plateau 100 gr. ou 100 gr. plus 1 milligramme sans rien mettre dans l'autre?

§ 2. *Composition des couleurs; couleurs complémentaires.*

Effet produit sur l'œil par les lumières de différentes couleurs. — Après avoir montré quelle est l'influence de l'intensité de la lumière sur l'impression produite sur la rétine, il faut examiner comment cette impression varie quand la couleur de la lumière, c'est-à-dire le nombre

des vibrations relatives aux rayons que l'on considère, vient à changer.

Le nombre de vibrations d'une lumière est en raison inverse de la durée de ces vibrations, et comme dans l'éther du vide toutes les vibrations se propagent avec la même vitesse quelle que soit leur période, le chemin parcouru par une lumière pendant la durée d'une vibration sera proportionnel à cette durée; c'est ce chemin qu'on appelle la *longueur d'onde* de la lumière considérée.

On est dans l'habitude de se servir de cette quantité pour caractériser les différentes espèces de lumière. Dans les corps les choses ne se passent pas comme dans le vide, et les lumières de périodes différentes s'y propagent avec des vitesses inégales; la vitesse que possédaient ces lumières dans le vide se trouve altérée différemment, suivant leur période et suivant la nature du corps traversé.

Un des effets les plus immédiatement appréciables quand la lumière pénètre dans les corps est la *dispersion*, ou si l'on veut la séparation des lumières de chaque période dans différentes directions ainsi qu'on l'observe lorsqu'un faisceau composé vient à traverser des milieux dont les faces ne sont pas parallèles; mais comme cette dispersion varie avec la nature des corps, c'est-à-dire comme la réfrangibilité d'une lumière de période donnée varie avec la nature du corps réfringent, on voit que la seule manière de définir rigoureusement une lumière donnée est d'indiquer sa période de vibration ou mieux sa longueur d'onde dans le vide. On a donné dans le tome Ier, page 147, un tableau contenant les longueurs d'onde de quelques rayons définis par leur couleur ainsi que par leur voisinage avec plusieurs des principales raies du spectre solaire.

Ce n'est que dans des circonstances extrêmement rares, le plus souvent préparées à dessein, que l'œil perçoit de la lumière simple, c'est-à-dire dont tous les rayons aient même longueur d'onde. Il est aussi très-rare qu'il reçoive toutes les lumières exactement dans les mêmes proportions où elles se trouvent dans la lumière solaire. Les corps dont la lumière se trouve satisfaire ou à peu près à cette dernière condition, sont dits *blancs*.

Les lumières simples ou composées font éprouver une infinité de sensations diverses suivant la proportion plus ou moins grande de chacune d'elles dans le mélange. Une très-petite différence entre deux sensations s'exprime en disant qu'il existe une *nuance* entre les couleurs des corps qui procurent ces sensations. Lorsque la différence entre

les sensations dépasse une certaine limite de grandeur, on dit que les couleurs sont différentes. Le langage ordinaire a classé les différentes sensations de coloration en les rapportant à celles fournies par des objets s'offrant fréquemment à la vue, par exemple le bleu du ciel, le vert des feuilles, etc. Mais ces types sont extrêmement variables, de telle sorte qu'un nom de couleur ne peut rappeler que d'une manière très-vague la sensation que ferait éprouver un objet de la coloration désignée, d'autant plus que l'appréciation des couleurs, au point de vue des nuances, est surtout un résultat de comparaison immédiate et simultanée, résultat dépendant du degré d'éducation de l'observateur, et ainsi que de son état physiologique.

Le vocabulaire des couleurs employées dans les arts, et surtout par les teinturiers, est excessivement varié et étendu; il dépend des pays, des ressources de l'industrie et aussi de la mode; celui des peintres est déjà moindre, parce que le nombre des substances colorées qu'ils mettent en œuvre est beaucoup plus restreint; celui du langage ordinaire l'est encore davantage. Il en faut conclure que nos sensations, tout en présentant un degré infini de variétés, peuvent néanmoins se comparer à un petit nombre de sensations considérées comme types, pouvant se composer entre elles; c'est du moins ce qu'indiquent les noms composés qu'on donne aux couleurs des corps, tels que ceux de jaune-vert, vert-jaune, bleu-vert, bleu-violet, etc.

Il faut remarquer à ce sujet que ces associations de mots ne se font jamais qu'entre les noms de certaines couleurs et jamais entre ceux d'autres couleurs; on ne dira jamais vert-rouge ou rouge-vert, ni bleu-jaune ou jaune-bleu. La seule conclusion qu'on puisse inférer de là relativement aux sensations c'est que, au moins dans l'état normal, il en est qui sont tellement éloignées que l'on ne peut leur trouver aucune analogie entre elles. Étant donnée un feuille d'arbre, on appréciera du premier coup qu'elle est verte, mais un examen plus attentif, et surtout quelque comparaison avec un type dénommé, fera décider si elle est d'un vert-jaune ou d'un vert-bleu; si elle est vert-jaune, on aurait pu la dire tout d'abord jaune-vert, mais on ne l'aurait jamais dite jaune-orangé.

Ce qu'il y a de certain, c'est que l'état de simplicité ou de composition d'une sensation colorée ne peut pas être déterminé à priori; ce n'est que par des expériences spéciales que l'on peut décider si telle ou telle lumière est simple ou bien plus ou moins composée.

Si l'on prenait des échantillons d'une très-grande quantité d'objets

colorés tels que la nature les fournit, et si l'on cherchait à les disposer les uns à côté des autres, de façon à ce qu'on puisse passer de l'un à l'autre par des degrés insensibles, on serait amené (en supposant l'œil dans les conditions normales) à les disposer ainsi :

B.	blanc	blanc	blanc	blanc	blanc	B
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
M.	rouges	jaunes	verts	bleus	violets	M
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
N.	noir	noir	noir	noir	noir	N

c'est-à-dire de manière à trouver dans des lignes horizontales, par exemple, des couleurs marchant du rouge au violet, et à aller dans les lignes verticales du *noir* au *blanc* en restant dans la même teinte. C'est cette classification expérimentale que M. Chevreul a réalisée ; on y reviendra plus loin dans un paragraphe spécial ; on indique seulement ici un fait d'expérience permettant de tirer certaines inductions pour la théorie des couleurs.

D'abord on peut aller du blanc au noir dans une même teinte. La sensation du blanc est bien réelle, mais celle du noir ne l'est pas; pour que l'on porte un jugement concluant à l'existence de noir, il faut réunir l'idée de la présence d'un corps dans une certaine direction à la constatation d'un manque de lumière (absolu ou relatif) dans cette direction. Le noir n'est donc pas, une sensation ou une couleur, mais une perception; il n'est pas susceptible de plus ou de moins, et l'on ne peut passer du blanc au noir que par une dégradation du blanc, ou si l'on veut par une intensité de sensation blanche décroissant d'une certaine valeur jusqu'à zéro.

Ainsi, en supposant que l'on veuille réaliser le tableau précédent, il faudrait dégrader de la lumière blanche suivant des lignes parallèles depuis BB où elle aurait une certaine intensité (celle des objets blancs les plus fortement colorés qu'offre la nature, un papier blanc éclairé normalement par les rayons solaires, etc.), jusqu'à NN où cette intensité serait nulle. Cela fait on dégraderait, par exemple, chaque teinte suivant une même ligne verticale en partant d'une unité arbitraire d'intensité colorée appliquée sur la ligne BB qui diminuerait en suivant la même loi que la lumière blanche pour devenir nulle à la rencontre de la ligne NN.

L'optique physique a appris quelles sont les couleurs qui résultent

du mélange des rayons de lumières simples ou composées. En ce qui concerne les lumières simples M. Helmholtz, qui s'est occupé d'une manière spéciale de l'étude de leurs mélanges, admet une combinaison donnant une couleur qui ne se retrouverait pas dans les mélanges de blanc et de couleurs simples, ce serait *le pourpre* obtenu par les mélanges de violet et de rouge; il est vrai de dire que les mélanges de blanc et d'autres couleurs n'ont pas été étudiés dans toute l'échelle chromatique, que les expériences sont toujours fort délicates et que leur résultat est toujours entaché de l'idiosympathie de l'observateur. Quoi qu'il en soit, M. Helmholtz a formulé le principe que voici : « La sensation colorée produite par une certaine quantité de lumière mélangée quelconque peut toujours être reproduite par le mélange d'une certaine quantité A de lumière blanche avec une certaine quantité B de lumière saturée (couleur du spectre ou pourpre) d'un ton déterminé. »

Newton est le premier qui ait cherché à composer les couleurs résultant, non-seulement des rayons du spectre, mais encore du mélange de liquides ou de poudres colorées (1). On sait que sa méthode empirique pour le mélange des rayons lumineux du spectre, consistait à diviser la circonférence d'un cercle en 7 arcs proportionnels aux intervalles des sons contenus dans une octave, c'est-à-dire aux nombres suivants :

$$\frac{1}{9},\ \frac{1}{16},\ \frac{1}{10},\ \frac{1}{9},\ \frac{1}{16},\ \frac{1}{16},\ \frac{1}{9}.$$

Le 1er intervalle représentait le rouge, le 2e l'orangé, etc., et le 7e le violet. Si l'on suppose que les secteurs du cercle ainsi divisé représentent les couleurs simples, en cherchant les centres de gravité des arcs et en appliquant à chaque centre de gravité un poids proportionnel à la quantité de lumière que l'on produit de chaque nuance, la couleur de la nuance résultant du mélange se trouve représentée par celle du secteur dans lequel tombe le centre de gravité où se trouve appliquée la résultante des différents poids.

Cette manière de composer la nuance résultant du mélange de différentes lumières est donc le premier exemple de la représentation sur un cercle, des couleurs passant de l'une à l'autre, le rouge se joignant au violet. Biot s'en est servi avec avantage pour la comparaison des teintes dues aux effets de polarisation circulaire. Cette méthode n'avait

(1) Newton, *Optique*, livre Ier, partie 2, 6e proposition.

été appuyée que sur des comparaisons qualitatives et non quantitatives (1); dans ces dernières années des résultats plus précis ont été obtenus d'abord par M. Maxwell (2) en perfectionnant la méthode de M. Plateau qui consiste à placer des substances colorées sur un disque tournant, et surtout par M. Helmholtz, qui s'est appliqué à n'employer que des lumières spectrales (3).

Il est souvent commode de pouvoir mélanger la lumière chromatique des objets naturels, par exemple le bleu du ciel, avec celle de corps connus pour en apprécier exactement la teinte : la disposition représentée fig. 72, et qui est due à M. Helmholtz, est des plus simples : elle consiste à placer sur une table en *b* et *c* les deux objets dont on veut superposer les couleurs et à les regarder, l'un au travers d'une glace non étamée à faces parallèles *a*, l'autre *c* par réflexion sur la face antérieure de cette glace. On peut aussi mélanger par ce procédé des lumières provenant de sources quelconques; il suffit alors de percer la table aux endroits *b* et *c* et de diriger par ces ouvertures les lumières sur lesquelles on veut opérer.

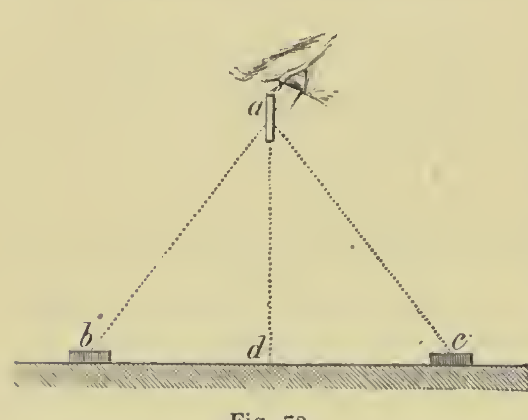


Fig. 72.

Couleurs complémentaires. — Un des exemples les plus frappants de la composition des couleurs est celui des couleurs complémentaires, c'est-à-dire des couleurs simples dont la réunion peut donner la sensation du blanc. Cette propriété des couleurs spectrales prises deux à deux fut découverte par Newton; parmi les diverses méthodes qu'il a indiquées, la plus imparfaite était celle qui consiste à mélanger des poudres et des liquides colorés, et c'est elle que plusieurs observateurs ont employée, ce qui rend leurs résultats souvent contradictoires.

Étant données deux couleurs simples complémentaires, pour qu'on puisse par leur réunion former du blanc, il faut que leurs intensités soient dans un certain rapport qui n'est pas celui de l'intensité de ces mêmes

(1) Biot, *Traité de physique* et *Mémoires sur la polarisation chromatique.*

(2) On the theory on color.... Edimb., *Transact.,* t. XXI, p. 275, 1855. — *Athenæum,* 1856. — *Edimb. journal,* t. II. — *Report of Bristish ass.*, 1856-1860.

(3) Voir pour le détail des appareils : Helmholtz, *Optique physiologique*, page 402 et suivantes.

couleurs dans le spectre solaire ; d'ailleurs, ainsi qu'on l'a déjà dit antérieurement, on ne connaît pas de procédé pour comparer les intensités des couleurs différentes.

M. Helmholtz a dressé un tableau des longueurs d'onde d'une série de couleurs complémentaires prises deux à deux ; il a trouvé ainsi, les longueurs d'onde étant exprimées en millionièmes de pouce de Paris :

Couleurs.	Longueur d'onde.	Couleurs complémentaires.	Longueur d'onde.	Rapport des longueurs d'onde.
Rouge.	2425	Bleu verdâtre.	1818	1,334
Orangé.	2244	Bleu.	1809	1,240
Jaune d'or.	2162	Bleu.	1793	1,206
Jaune d'or.	2120	Bleu.	1781	1,190
Jaune.	2095	Bleu indigo.	1716	1,221
Jaune.	2085	Bleu indigo.	1706	1,222
Jaune verdâtre.	2082	Violet.	1600	1,301

Comme on le voit, il n'y a aucun rapport déterminé entre les longueurs d'onde de deux couleurs complémentaires, puisque ce rapport varie entre celui de la quarte (1,333) et celui de la tierce mineure (1,20).

D'après le même auteur le vert proprement dit n'aurait pas de couleur simple complémentaire ; pour produire du blanc il faudrait ajouter au vert un mélange de violet et de rouge, lequel mélange forme le pourpre.

Contrairement à ce que semblent indiquer les mélanges de matières colorantes, aucun mélange de jaune et de bleu ne peut donner de vert ; mais une analyse plus exacte montre que de semblables mélanges, fréquents dans les applications, ne fournissent du vert qu'à la condition d'être formés avec un jaune et un bleu contenant chacun du vert.

Quand au lieu de mélanger deux lumières complémentaires on en mélange d'autres, on doit, avec M. Helmholtz, considérer deux cas :

1° Les deux lumières mélangées sont comprises entre deux lumières complémentaires ; dans ce cas, il en résulte une couleur intermédiaire qui tire d'autant plus sur le blanc que l'intervalle entre les couleurs employées est plus considérable, et qui est au contraire d'autant plus saturée que cet intervalle est plus petit.

2° Les deux lumières comprennent entre elles un plus ou moins grand nombre de couples de lumières complémentaires ; dans ce cas on obtient du pourpre ou des couleurs intermédiaires entre l'une des

couleurs mélangées et l'extrémité correspondante du spectre; le mélange étant d'autant plus fort en couleur que l'intervalle des couleurs dans le spectre est plus grand, et d'autant plus blanchâtre que cet intervalle est plus petit, tout en restant supérieur à celui de deux couleurs complémentaires.

Une déduction importante de ces expériences faites sur le mélange des couleurs, c'est que les lumières contenues dans le spectre solaire y existent avec des degrés de saturation différents. Ainsi le rouge mêlé avec un vert d'égale intensité donne un orangé rougeâtre, et le violet mêlé à un vert d'égale intensité lumineuse donne un indigo voisin du violet. Le degré de saturation du vert serait donc moindre que celui du rouge ou du violet.

§ 3. *Hypothèses sur le mécanisme de la sensation des couleurs. — Dyschromatopsie.*

L'examen anatomique n'a rien révélé encore sur les moyens de perception des couleurs; on sait seulement que ces perceptions peuvent être altérées d'une manière permanente dans certaines affections naturelles ou passagèrement par l'effet de certaines substances. Des courants électriques, d'après M. Schelske (1), peuvent produire des sensations colorées qui se composent avec des couleurs objectives : un courant ascendant ajoute, un courant descendant retranche une certaine quantité de violet bleuâtre à la nuance des objets observés.

Dyschromatopsie. — L'affection des yeux qui diffèrent de l'œil normal au point de vue de la sensation des couleurs porte le nom d'*achromatopsie*. On a parlé d'individus qui étaient entièrement dépourvus de toute idée de couleur et qui ne distinguaient que des lumières plus ou moins intenses; mais le cas le plus fréquent, à des degrés différents, est celui des yeux qui ne voient dans le spectre que deux couleurs qu'ils appellent le bleu et le jaune; c'est la *dyschromatopsie*. On a aussi appelé cette affection le *daltonisme*, du nom du chimiste anglais Dalton qui en était atteint. D'après M. G. Wilson (2), cette affection serait assez fréquente à des degrés modérés; il aurait trouvé un cas sur dix-huit personnes environ. Il est probable, d'ailleurs, que les yeux les plus normaux présentent entre eux des différences notables dans l'appréciation des couleurs; c'est sans doute ainsi qu'il faut expliquer la préférence que les peintres ont sou-

(1) *Archiv. für ophth.*, tomes IX et XI.
(2) *A note on the statistics of colour blindness, in year-book of facts.* — 1858.

vent pour telle ou telle teinte, et qui est quelquefois caractéristique de leurs œuvres.

Le daltonisme porte aussi le nom plus systématique d'*anérythropsie* (difficulté à percevoir le rouge).

Une personne en prenant 55 centigr. de santonate de soude peut éprouver une altération de la vue qui commence au bout de 10 à 15 minutes et dure pendant quelques heures. Elle voit alors en jaune verdâtre les objets éclairés, et en violet les surfaces obscures, sans doute par un effet de contraste, car elle cesse de percevoir l'extrémité violette du spectre.

Hypothèses sur le mécanisme de la sensation des couleurs. — Th. Young a cherché à ramener la sensation des couleurs à celle de la superposition de trois excitations inégales. D'après son système, il existerait dans l'œil trois appareils sensoriaux donnant respectivement la sensation du rouge, du vert et du violet. Toute espèce de lumière serait capable d'exciter chacun de ces appareils que nous désignerons sous l'expression plus habituelle de *fibres*, mais avec une intensité qui serait fonction de la longueur d'onde. La sensibilité de chaque système de fibres pour les lumières de différentes longueurs d'onde dans le spectre, serait par exemple représentée, à intensité égale, par les courbes de la figure 73.

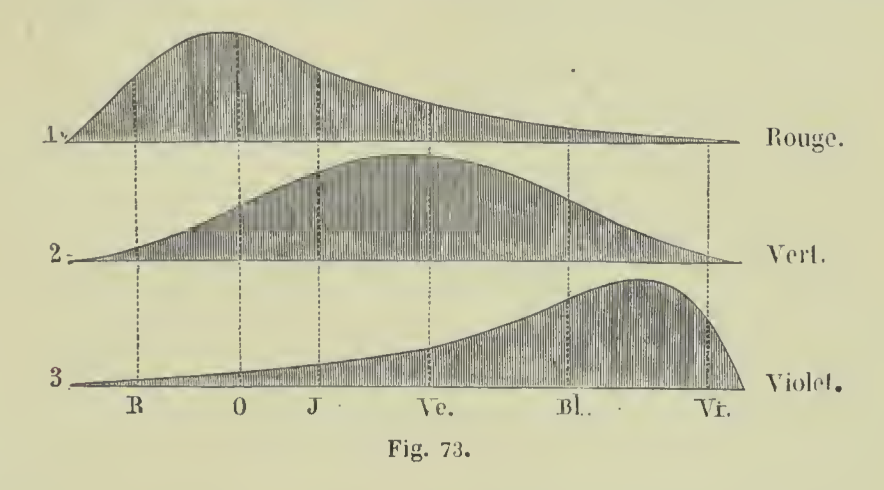


Fig. 73.

La courbe supérieure de R en Vi représenterait l'intensité du rouge dans les différentes parties du spectre solaire; la 2e courbe celle du vert et la 3e celle du violet. On voit alors que pour avoir la sensation produite dans une partie du spectre, dans le jaune par exemple, il faudrait faire la somme des intensités, c'est-à-dire des trois lignes verticales qui entre les courbes et les lignes horizontales correspondent à la lettre J.

Rien, au point de vue anatomique, ne vient appuyer cette opinion; mais d'un autre côté les expériences faites par des yeux normaux sur le mé-

lange des couleurs lui sont favorables. Il en est de même de celles auxquelles on peut soumettre les yeux affectés de dyschromatopsie; c'est ainsi que pour les daltoniens toutes les sensations colorées peuvent se composer au moyen du mélange de deux couleurs fondamentales.

Les sensations primitives de Young n'ont d'ailleurs rien d'absolu, et d'autres observateurs ont pris des couleurs fondamentales plus ou moins différentes : Brewster avait pris le rouge, le jaune et le bleu, et M. Maxwell des couleurs se rapportant aux types rouge, vert et bleu-violet; M. Helmholtz a fait observer que ces trois dernières couleurs permettent de se rapprocher davantage des résultats des observations. Ces différences ne doivent pas surprendre si l'on songe que tous les yeux considérés comme normaux n'apprécient pas exactement de la même manière les mélanges de couleurs.

Intensité relative des sensations produites par des lumières différemment colorées. — Il a été question jusqu'ici des différences des couleurs, mais non de leur intensité comparative. On ne peut rien dire de certain sur ce sujet, car les moyens de comparer les intensités de deux couleurs différentes manquent complétement; la grandeur relative de ces sensations peut résulter de deux causes : d'abord de la sensibilité de la rétine pour les différentes couleurs, et ensuite de l'intensité absolue de chaque lumière admise dans l'œil.

La sensibilité pour les différentes couleurs varie d'un individu à un autre, comme on l'a vu plus haut, mais varie-t-elle d'une couleur à l'autre dans le même organe? Pour le reconnaître il faudrait une commune mesure de l'intensité des lumières de différentes couleurs. Théoriquement cette intensité varie proportionnellement à la force vive du mouvement lumineux d'une molécule éthérée pendant l'unité de temps, et si tout ce mouvement pouvait se transformer en chaleur, on pourrait prendre l'action calorifique pour mesure de l'action lumineuse; mais il ne saurait en être ainsi, comme on l'a exposé dans ce volume, livre Ier, page 26, car l'intensité de la chaleur accusée par une pile recouverte de noir de fumée que l'on promène dans le spectre diminue du rouge au violet, est plus forte dans le rouge que dans le jaune où cependant se trouve le maximum d'éclairement.

Mais au moyen des effets chimiques on pourrait peut-être résoudre cette question : si l'on se reporte en effet à ce qui a été dit sur l'actinomètre électro-chimique décrit antérieurement, page 130, on voit là un appareil dans lequel la matière sensible, qui est le sous-chlorure d'argent,

se trouve être impressionnable entre les mêmes limites de réfrangibilité que la rétine. Si cette substance donnait un courant électrique dont l'intensité fût proportionnelle à celle des rayons actifs, comme le courant électrique est produit dans les différentes parties du spectre, on aurait ainsi un moyen de comparer entre eux les effets produits par les rayons différemment colorés.

M. Chevreul (1), dans ses recherches sur la comparaison des couleurs, a reconnu que le mélange d'une certaine quantité de lumière blanche avec une couleur du spectre peut changer la teinte de celle-ci. Ainsi le milieu de l'espace G H du spectre solaire qui à une lumière diffuse faible correspondait au 3e bleu violet de la gamme chromatique dont il va être question ci-après, passait au 4e bleu violet quand on éclairait cet espace avec une lumière diffuse plus intense.

D'un autre côté, il a reconnu également que si l'on fait varier l'intensité d'un faisceau lumineux provenant soit d'une certaine partie du spectre solaire, soit de rayons qui ont traversé des écrans de verre coloré, la nuance obtenue change selon l'intensité du faisceau ; ainsi en général les lumières violettes prennent du rouge en se dilatant, et au contraire tournent un peu au bleu en se condensant; la lumière bleue prend du jaune en se dilatant. Une manière très-simple de constater ce changement de nuance consiste à introduire un faisceau lumineux dans une chambre noire, à lui faire traverser un écran en verre coloré, puis une lentille, et à recevoir la moitié de l'image de l'ouverture sur un écran blanc placé à quelque distance du foyer et l'autre moitié à une autre distance ; on évalue aisément de cette manière les rapports des intensités lumineuses d'une même étendue de chaque image.

M. Helmholtz (2) en comparant les intensités des couleurs du spectre d'après différentes méthodes en a conclu que l'intensité de la sensation est une fonction de l'intensité lumineuse qui diffère suivant l'espèce de lumière. Ainsi, lors de la combinaison des couleurs, il a trouvé que l'intensité apparente du violet qui donne du blanc avec le jaune vert est $\frac{1}{10}$ de ce jaune pour un éclairage intense, tandis qu'elle n'est que le $\frac{1}{5}$ pour un éclairage plus faible.

Il semble résulter de l'ensemble des faits observés que lorsque la rétine perçoit une impression colorée, en même temps elle reçoit une impression qui correspond à une certaine quantité de lumière

(1) Moyen de nommer et de définir les couleurs. *Mém. de l'Acad. des sciences*, t. 33, p. 77.
(2) *Optique physiologique*, p. 422.

blanche; s'il en est ainsi, la nuance doit paraître varier avec l'intensité de la lumière, et l'on se rendrait compte comment, d'après les expériences de M. Chevreul, quand l'intensité d'une lumière colorée augmente, l'impression sur la rétine devient plus blanche, et d'autant plus que cette intensité est plus considérable.

Limites de sensibilité de la rétine. — On a déjà parlé plus haut, page 307, de l'absorption des rayons infra-rouges par les milieux de l'œil, mais il peut encore arriver assez de rayons de cette réfrangibilité sur la rétine pour donner une impression si celle-ci était sensible à leur influence; comme le spectre lumineux se limite au rouge extrême un peu en deçà de la raie A, il faut donc admettre qu'au delà d'une certaine longueur d'onde l'œil ne peut plus percevoir les impressions dues à la transmission du mouvement des molécules éthérées.

Il ne paraît pas en être de même pour les rayons ultra-violets, car on a vu dans le 1er volume, page 141, que ces rayons peuvent devenir visibles quand on les observe dans des spectres parfaitement épurés en se servant de prismes formés de substances, comme le quartz, qui n'absorbent pas ces rayons. M. Helmholtz a reconnu que la lumière ultra-violette reçue sur un écran de bisulfate de quinine doit paraître 1200 fois plus intense que lorsqu'elle est reçue sur une surface mate de porcelaine qui la renvoie à l'œil par simple diffusion; cela prouve que si la rétine est sensible à l'influence de ces rayons très-réfrangibles, son impressionnabilité est bien faible, et qu'elle se trouve rentrer dans les conditions communes à toutes les substances impressionnables étudiées dans cet ouvrage, c'est-à-dire qu'elle est sensible entre certaines limites de réfrangibilité au delà desquelles les vibrations lumineuses n'ont plus d'action; seulement les limites sont difficiles à déterminer, car au delà et en deçà de la position du maximum d'action dans le spectre solaire, l'intensité avec laquelle la rétine est impressionnée va toujours en diminuant.

§ 4. *Classification des couleurs. Gammes chromatiques.*

M. Chevreul (1), pour déterminer d'une manière fixe le classement des nuances que présentent les objets naturels, a établi des types invariables auxquels peuvent être rapportées toutes les couleurs naturelles et artificielles. Il a imaginé, dans ce but, la construction chromatique hémisphérique comprenant, dans leur ensemble, les tons d'une

(1) Contraste simultané. Paris, 1839. — *Mém. de l'Académie des sciences*, t. 33 (1861).

même nuance et les nuances des diverses couleurs, alors que ces tons et que ces nuances passent de l'un à l'autre par certains degrés qui sont suffisamment rapprochés pour qu'une couleur donnée puisse être comprise entre deux nuances types dont elle diffère très-peu.

Les différentes nuances des couleurs que M. Chevreul a nommées *franches* et qui ne sont supposées mélangées ni de teintes sombres ni de blanc, ont été prises au nombre de 72; il les a réparties autour d'une circonférence divisée par 72 rayons correspondant à ces 72 couleurs. Sur trois divisions de la circonférence également espacées entre elles, c'est-à-dire à 120° de distance, il a placé les noms de trois couleurs simples, le rouge, le jaune, puis le bleu. M. Chevreul a pris pour types de ces couleurs les nuances de certaines parties du spectre qui seront indiquées plus loin. Il a intercalé ensuite entre elles, au moyen d'une méthode empirique très-simple qui est indiquée dans ses mémoires, l'orangé, le vert et le violet, de manière que l'orangé partage également l'intervalle compris entre le rouge et le jaune, le vert l'intervalle compris entre le jaune et le bleu, et le violet l'intervalle entre le bleu et le rouge.

Il a intercalé ensuite entre les 6 couleurs précédentes qui sont à 60° de distance sur la circonférence, les six couleurs, rouge orangé, orangé jaune, jaune vert, vert bleu, bleu violet, violet rouge; enfin dans chaque intervalle de ces 12 couleurs il a placé cinq couleurs équidistantes, par exemple entre le rouge et le rouge-orangé :

Le 1er rouge,
Le 2e rouge,
Le 3e rouge,
Le 4e rouge,
Le 5e rouge,

et entre le rouge orangé et l'orangé :

Le 1er rouge orangé,
Le 2e rouge orangé,
Le 3e rouge orangé,
Le 4e rouge orangé,
Le 5e rouge orangé,

et ainsi des autres. On a donc de cette manière, autour de la circonférence, les 72 couleurs qui portent le nom de nuances. La planche co-

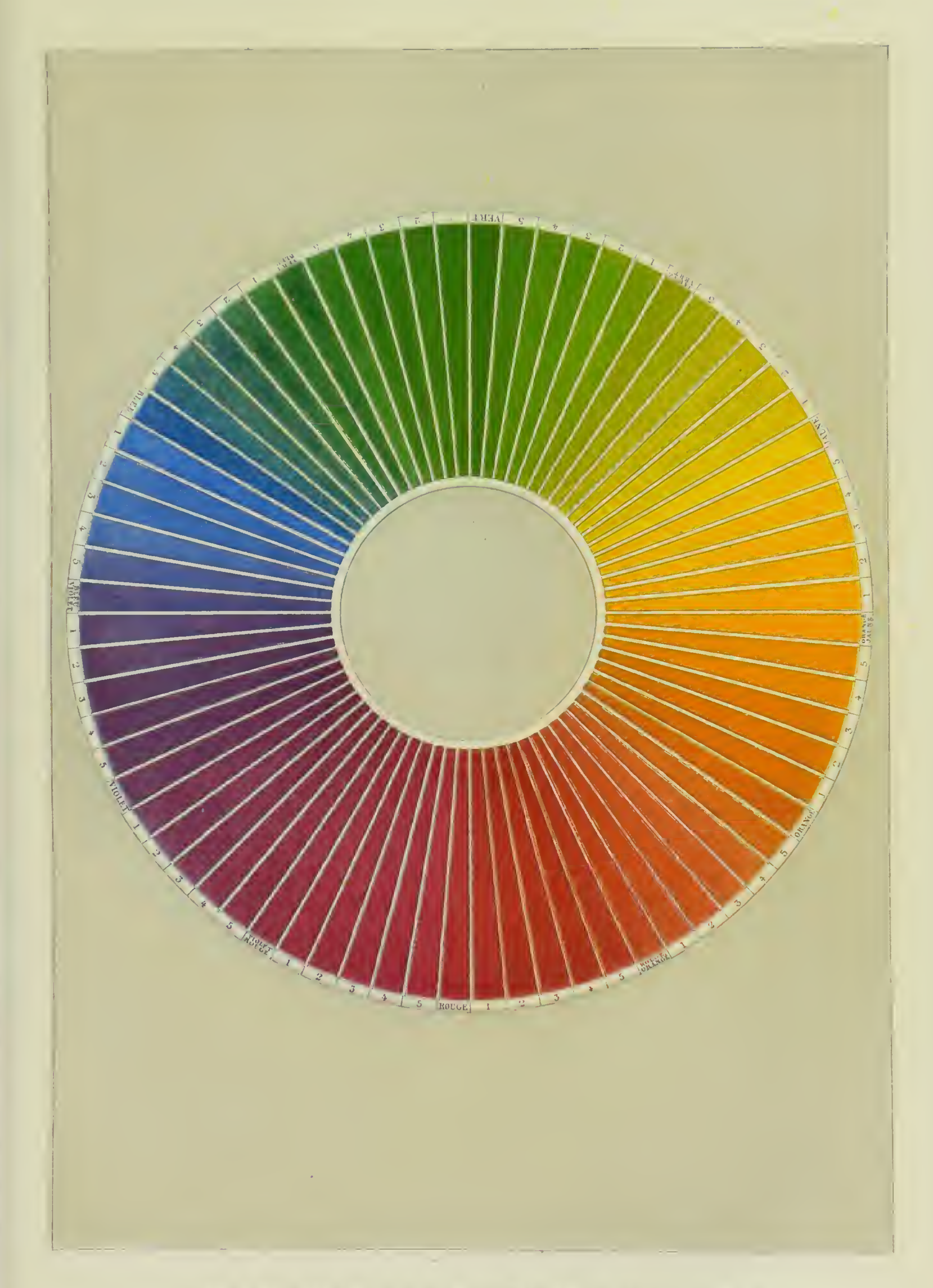
loriée annexée ci-contre représente le cercle chromatique des couleurs franches.

Les nuances comprises entre deux couleurs simples sont dites composées, car elles contiennent dans leur constitution les deux couleurs simples en proportions variables avec leur éloignement de l'une ou de l'autre. Ainsi l'orangé placé à distance égale du rouge et du jaune contient un mélange de ces deux couleurs; le vert est un mélange de jaune et de bleu, etc.

On a dit plus haut que le rouge, le jaune et le bleu correspondaient à des parties déterminées du spectre; voici quelles sont les déterminations faites par M. Chevreul en comparant les couleurs du cercle chromatique avec celles d'une spectre solaire formé au moyen d'un prisme en sulfure de carbone et présentant les raies principales :

Parties du spectre désignées par les raies.	Couleurs du cercle chromatique.
Entre A et B	5 Violet rouge
Entre B et C	Rouge.
A $\frac{1}{2}$ de la distance C D	5 Rouge
En D	Entre 2 et 3 Orangé
A $\frac{1}{3}$ de DE à partir de D	Jaune
En E	4 Jaune vert
Entre E et b	Vert
Entre F et G, tangent à F	Bleu
En G	1 Bleu-violet
Au milieu de GH	3 Bleu-violet
H	Violet?

Si chaque secteur du cercle chromatique était coloré d'une manière uniforme, on n'aurait que 72 nuances, mais chacune d'elles peut varier quant à l'intensité de sa couleur, c'est-à-dire qu'elle peut être plus ou moins foncée. On peut représenter sur le même cercle chromatique ces changements, en partageant les rayons en 20 longueurs égales et en décrivant à partir du même centre 20 circonférences équidistantes. Si l'on considère une seule couleur, on figurera vers le centre le blanc, et sur un même rayon, à mesure que l'on s'éloignera du centre, cette couleur sera supposée de plus en plus foncée. Ainsi la première petite surface en partant du centre sera blanche; la seconde, comprise entre



CLASSIFICATION DES COULEURS

d'après le Système de M Chevreul

CERCLE CHROMATIQUE DES COULEURS FRANCHES

le 1[er] cercle et le second, sera couverte par une très-faible quantité de couleur, de sorte qu'elle aura l'aspect de blanc légèrement teinté; la 3[e] surface, comprise entre le 2[e] et le 3[e] cercle, sera un peu plus foncée mais toujours de même nuance, et ainsi de suite; en suivant les surfaces le long d'un même rayon, on augmentera l'intensité de la couleur et on arrivera à la dernière surface voisine de la circonférence, dont la couleur sera si foncée qu'elle semblera presque noire; enfin à l'extérieur du cercle on suppose l'absence de lumière ou le noir.

L'ensemble de cette dégradation d'une même nuance est appelée *gamme,* et les parties diverses d'une même gamme se nomment des *tons;* ces tons ont été choisis expérimentalement au point de vue optique pour qu'ils soient également espacés ou distincts entre eux. Les mémoires de M. Chevreul cités plus haut renferment l'indication de la méthode suivie pour obtenir ces résultats.

Chacune des 72 nuances du cercle chromatique est degradée en 20 tons, puisque toutes les premières surfaces ayant pour sommet le centre du cercle chromatique sont blanches dans toutes les gammes; le premier ton de chaque gamme ne commence qu'entre le 1[er] et le 2[e] cercle. Les tons compris dans chaque gamme entre deux cercles sont dits à la même hauteur. On voit, d'après cela, que les 72 gammes du cercle, dégradés en 20 tons, forment 1440 couleurs d'intensité et de hauteur différentes; on les appelle *couleurs franches*, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas rabattues par du gris qui en domine l'éclat. Mais il est rare que la nature présente des objets colorés ainsi et le cercle chromatique dont il vient d'être question ne serait pas complet s'il ne donnait pas les changements qu'éprouve chacune des couleurs franches, par son mélange avec diverses proportions de gris; c'est alors la partie hémisphérique du cercle qui va donner toutes ces nuances ainsi rabattues.

Supposons que l'on fasse passer un plan perpendiculaire au cercle précédent, et passant par le rayon correspondant, au rouge, par exemple; supposons ensuite que l'on décrive sur ce plan, avec les mêmes rayons que ceux du cercle horizontal, 21 cercles qui correspondent à ceux décrits sur celui-ci et ayant le même centre, et que l'on divise la demi-circonférence du plus grand cercle en 20 parties égales. On remarquera que chaque moitié de ce demi-cercle aura 10 segments; les 10 segments qui comprendront le quart de cercle correspondant à la gamme rouge seront destinés à donner toutes les nuances rabattues de rouge, et les 10 autres donneront les nuances rabattues de la gamme

verte qui se trouve à 180° du rouge sur le cercle chromatique horizontal des gammes franches.

L'ensemble des tons des 10 segments rouges sera formé par la dégradation du blanc à l'absence de lumière ou au noir, en passant par le gris dans les mêmes conditions d'équidistance de ses tons que dans les gammes ordinaires. Ces gammes en s'éloignant du rouge, pour se rapprocher du gris, perdront de la première couleur pour prendre du gris dans la proportion de leur éloignement de la gamme du cercle horizontal des couleurs franches ; la transition est tout à fait semblable à celle dont on a parlé plus haut. Ainsi la première gamme du plan vertical, voisine du rouge, contiendra $\frac{9}{10}$ de rouge et $\frac{1}{10}$ de gris ; la deuxième gamme en s'éloignant du rouge contiendra $\frac{8}{10}$ de rouge et $\frac{2}{10}$ de gris et ainsi de suite. Si l'on fait la même opération pour les 72 grammes franches, on voit que les 36 plans verticaux, passant par le centre commun, contiendront 72 quarts de cercle renfermant toutes les gammes rabattues de chacune des gammes franches, ainsi que la gamme de gris. Toutes les gammes rabattues au même degré, par exemple celle à $\frac{2}{10}$ de gris, peuvent, dans toutes les nuances, être supposées se trouver sur les génératrices d'un cône dont le sommet est au centre commun et ayant la gamme grise comme axe. L'ensemble de ces cônes à même sommet, à même axe et à génératrices égales, formera avec le cercle des couleurs franches le cercle chromatique hémisphérique contenant toutes les nuances et les tons de couleurs naturelles et artificielles.

Le nombre des couleurs et des teintes de cercle est facile à estimer : puisque le cercle chromatique des couleurs franches est formé de 20 fois 72 nuances, et qu'il y a 10 fois autant de couleurs rabattues, cela fait 14400 tons, comprenant toutes les nuances et tous les tons depuis le blanc jusqu'au noir.

Au lieu de représenter de cette manière les différentes nuances rabattues, on forme sur des plans des cercles chromatiques semblables à celui qui représente les gammes des couleurs franches plus ou moins foncées ; on a le cercle comprenant les couleurs rabattues à $\frac{1}{10}$ de gris, le cercle à $\frac{2}{10}$, etc., et chaque cercle contenant 1440 nuances, les 10 cercles plans donnent les 14400 nuances destinées à la comparaison des couleurs naturelles.

Ces déterminations des couleurs et des nuances normales ont été faites avec le plus grand soin par M. Chevreul, d'abord avec des écheveaux de laine teints, puis ensuite dans certains cas avec des émaux

vitrifiés, et reproduites également sur papier. Il y aurait un très-grand intérêt à ce qu'elles fussent toutes reproduites par des émaux. On peut toujours, en suivant la méthode simple qu'il a décrite avec soin, retrouver les différentes nuances dont il s'agit et refaire à nouveau ce cercle, car M. Chevreul a eu soin de comparer aux différentes nuances et tons de son cercle chromatique non-seulement les couleurs du spectre solaire qui servent de type comme on l'a vu plus haut, mais encore les couleurs des principales fleurs et des principaux fruits.

On peut exprimer aisément par une formule la couleur et le ton d'une nuance quelconque. On cherche d'abord dans le cercle des couleurs franches à quelle gamme la couleur peut appartenir; une fois la gamme trouvée, on cherche le ton de l'échantillon. Par exemple 2 R O 7 exprime 2e gamme du rouge orangé, 7e ton; 4 V B 6, exprime la 4e gamme du vert bleu, 6e ton.

Si maintenant, ce qui arrive habituellement, la couleur n'a ni la pureté ni l'éclat des couleurs franches, on cherche sa nuance correspondante dans les cercles chromatiques des couleurs rabattues. La première observation n'en est pas moins utile; mais quand elle est faite on cherche la nuance semblable à celle que l'on étudie dans les cercles des couleurs rabattues et la formule se complète : si l'on trouve par exemple que pour la 1re nuance ci-dessus il y a $\frac{4}{10}$ de gris, on écrira 2 R O 7 $\frac{4}{10}$, ce qui signifie deuxième gamme du rouge orangé septième ton, rabattu à $\frac{4}{10}$ de gris; dans le même cercle rabattu, la deuxième formule deviendrait 4 V B 6 $\frac{4}{10}$.

On suppose que l'intensité des lumières diverses est la même, mais en réalité, quand on veut comparer des couleurs inégalement éclairées, M. Chevreul a reconnu que la nuance pouvait changer un peu avec cette intensité comme on l'a dit précédemment page 339; ainsi une couleur violette très-vive se comporte comme donnant une sensation un peu plus bleue. Ces changements sont du reste compris entre de très-faibles limites.

Ce mode de classification des couleurs peut rendre des services aux arts et à l'industrie en donnant des types invariables puisqu'ils sont basés sur les couleurs simples des rayons différemment réfrangibles de la lumière solaire.

CHAPITRE III.

Phénomènes accessoires, simultanés ou consécutifs à la sensation lumineuse.

---

§ 1. *Irradiation.*

On comprend sous le nom d'irradiation une série de faits qui peuvent se résumer de la manière suivante : un champ limité, beaucoup plus vivement éclairé que le fond sur lequel il se projette, paraît plus grand qu'il ne l'est réellement; et réciproquement un champ obscur sur un fond vivement éclairé paraît plus petit qu'il ne l'est réellement. C'est ainsi que des fentes étroites très-vivement éclairées paraissent beaucoup plus larges qu'elles ne le sont : on peut faire facilement l'expérience avec la fente variable d'un porte-lumière adapté au volet de la chambre noire.

Les anciens avaient déjà remarqué ces faits; M. Plateau, dans ses recherches sur l'irradiation, cite le commencement de la troisième satire de Perse :

« Déjà la clarté du matin se fraye un passage par les fenêtres et la « lumière élargit les fentes étroites (1). »

Il ne faudrait cependant pas confondre complétement les illusions relatives aux fentes étroites avec celles que produisent des surfaces éclairées normalement; dans le cas des fentes, il y a nécessairement, d'une part, des effets de diffraction, de l'autre, une diffusion plus ou moins notable de la lumière sur les parois de la fente, circonstances qui ont pour effet de la faire paraître plus grande qu'elle ne l'est en réalité.

Les mêmes observations peuvent s'appliquer, en partie au moins, aux expériences dans lesquelles on cache avec le bord d'un écran une partie d'un corps lumineux qui paraît alors déborder sur l'écran.

La véritable manière d'expérimenter sur l'irradiation consiste à ob-

(1) . . . . Jam clarum mane fenestras
Intrat et angustas extendit lumine rimas.

server des figures noires sur fond blanc, ou blanches sur fond noir, et à éclairer vivement le tout; M. Plateau opérait aussi en découpant des figures dans du carton noir et les projetant sur la lumière des nuées en les plaçant à plusieurs mètres de distance.

Dans ces conditions, deux carrés ou deux cercles de mêmes dimensions, comme le représente la fig. 74, l'un blanc sur fond noir, l'autre noir

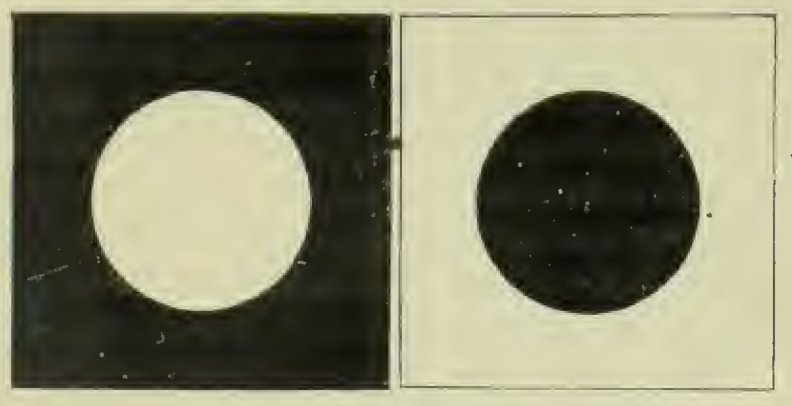


Fig. 74.

sur fond blanc, semblent inégaux, le blanc paraissant plus grand que le noir. Pour voir nettement l'effet il faut placer cette figure devant soi à la distance de la vision distincte, et même plus loin.

Il en est encore de même lorsqu'on juxtapose, suivant un diamètre, un demi-cercle blanc sur fond noir et un demi-cercle noir sur fond blanc et que les rayons sont les mêmes; la fig. 75 représente cet effet. C'est ainsi que lorsque la lune est nouvelle, le croissant paraît appartenir à un cercle d'un diamètre plus grand que celui du reste du disque faiblement illuminé de la lumière cendrée.

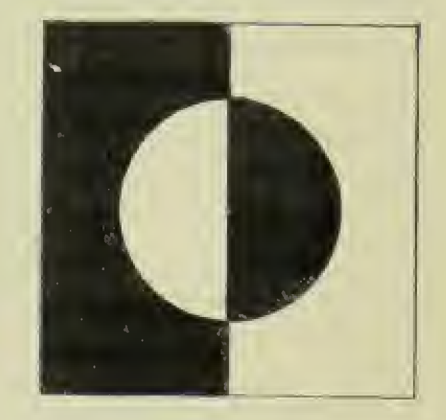


Fig. 75.

On pourrait citer beaucoup d'expériences relatives à ce sujet; ainsi des images lumineuses très-voisines se confondent. On a même remarqué, en faisant des observations analogues aux précédentes avec des figures rectangulaires au lieu de figures rondes, que des personnes jugeaient que l'extension des images dans les deux directions correspondantes aux côtés des rectangles était inégale.

M. Plateau (1) a beaucoup varié les expériences sur ce sujet, et on n'a

(1) *Mém. de l'Acad. de Bruxelles*, t. 11.

cité ici que les plus simples, c'est-à-dire celles où il ne semble pas possible de faire intervenir d'autres éléments que l'intensité de la lumière incidente. L'explication qu'il a donnée de ce phénomène, et qui a été défendue par un certain nombre de physiciens, consiste à admettre une propagation de l'excitation par la lumière, d'un élément de la rétine à un autre. M. Helmholtz (1) n'admet pas cette explication, car, dit-il, lors de l'excitation de filets nerveux dans certaines parties du corps, la sensation se trouve bien limitée aux points excités et il doit en être de même pour la rétine; il pense au contraire que la plupart de ces phénomènes sont dus à des effets d'accommodation inexacte et tiennent à des images de diffusion, c'est-à-dire à ce que, par défaut d'accommodation, les images lumineuses empiètent un peu en dehors des contours qu'elles devraient occuper à la distance de la vision distincte.

La question est difficile à résoudre, et quant à présent il ne paraît pas que l'on puisse supposer à priori que ces phénomènes soient dus seulement à un défaut d'accommodation. Il pourrait se faire que la diffusion eût lieu sur la rétine même autour des points éclairés, et alors les parties voisines pourraient être excitées par cette lumière diffusée; le même effet arrive quand on projette une image lumineuse sur une surface phosphorescente, ainsi qu'on l'a vu tome Ier, page 404.

Sans s'étendre plus longuement sur ce sujet, on peut dire que l'irradiation comprend un très-grand nombre de faits dépendant en partie des illusions du jugement, soit dans l'estimation des grandeurs, soit dans l'appréciation de la forme des lignes, et il est difficile de déterminer autrement que par des expériences directes la part des actions purement physiques et celle des opérations physiologiques qui constituent la perception des sensations.

§ 2. *Persistance de la sensation lumineuse; sa durée. Thaumatrope; Phénakisticope.*

L'ébranlement nerveux qui constitue la sensation lumineuse met un certain temps à s'établir; on ne connaît pas ce temps, mais l'ensemble des phénomènes connus montre qu'il doit être très-court, car jusqu'ici on n'a pas trouvé qu'il y ait eu lieu d'en tenir compte. Au contraire, lorsque l'impression lumineuse a cessé, la sensation ne se détruit com-

(1) Helmholtz, *Optique physiologique*, page 425.

plétement qu'au bout d'un temps très-appréciable; c'est ce qu'on appelle *la persistance de la sensation lumineuse.*

On peut observer directement le phénomène de la persistance en éteignant subitement une lampe sur laquelle on portait la vue; on continue alors à voir dans l'obscurité l'image de la flamme, et si l'on dirige l'œil dans une direction autre que celle qu'il avait, l'image persistante se meut en même temps, se maintenant constamment dans la position qui correspond à la partie impressionnée de la rétine. On pourrait aussi bien fermer subitement les yeux en les couvrant avec un mouchoir après avoir regardé un objet lumineux d'un éclat suffisant, comme une fenêtre éclairée ; on voit alors l'image subsister pendant quelque temps; mais il arrive parfois que l'on aperçoit une image d'un aspect différent et qui appartient aux images accidentelles qui seront étudiées dans le paragraphe suivant.

On peut citer comme exemple de la persistance l'effet bien connu produit par un charbon ardent que l'on agite rapidement dans l'obscurité ; on voit alors des traînées lumineuses comme si le charbon laissait dans l'air la trace de son passage. C'est à la même cause que l'on doit rapporter un grand nombre d'apparences que montrent des objets plus ou moins éclairés animés de divers mouvements; ainsi ce que l'on appelle les soleils des feux d'artifices lui doivent leurs brillants effets; la pluie, la grêle en tombant donnent, comme images, des lignes parallèles; une corde vibrante paraît renflée en son milieu, etc.

On pourrait indiquer bien des circonstances où l'on utilise la persistance, et à la fin de ce paragraphe on décrira des appareils très-curieux qui sont fondés sur son observation; mais on peut encore rappeler ici que M. Wheatstone (1), en éclairant vivement une petite sphère à surface réfléchissante fixée à l'extrémité de tiges vibrantes, a formé le *kaléidophone,* et que c'est sur ce principe que M. Lissajous (2) a basé les méthodes expérimentales dont il a fait usage pour comparer optiquement les nombres de vibrations de deux diapasons. M. Wheatstone a construit également un petit appareil photométrique dans lequel une perle brillante, qui se meut très-vite, donne au moyen des images des courbes lumineuses formées par la réflexion des deux lumières, l'indication de leurs différences d'intensité.

(1) Quarterly, *Journ. of sciences,* tom. 23, 1827.

(2) *Ann. de Chimie et de phys.,* 3e série, t. 51, p. 147.

On a vu dans le 1[er] volume, page 247 et suivantes, un exemple curieux du phénomène de persistance dans la construction du *phosphoroscope* qui donne aux corps phosphorescents une illumination et un éclat intermittent, lequel est rendu continu à l'observateur en vertu de la durée de la sensation sur la rétine. Si l'on se reporte à ce qui a été dit au sujet de la durée de la phosphorescence, page 260, on peut reconnaître qu'il y a une certaine analogie entre la manière d'être des corps phosphorescents, et les effets produits sur la rétine : sur les corps phosphorescents, l'illumination se fait dans un temps très-court, mais la persistance peut être plus ou moins longue, et est en général plus longue que le temps d'impression ; sur la rétine il en est de même et l'impression reçue dans un temps très-court persiste pendant un temps plus ou moins long.

La principale conclusion qui ressort de ces effets, c'est que des impressions lumineuses répétées avec une rapidité suffisante produisent le même effet sur l'œil qu'un éclairage continu.

D'Arcy (1) paraît avoir eu l'idée de mesurer le premier la durée de la persistance, en faisant mouvoir circulairement, dans l'obscurité, un charbon ardent de manière à obtenir l'apparence d'un anneau lumineux ; le temps de la révolution donnait la durée de la persistance de l'impression, car le corps lumineux repassait par chacune de ses positions antérieures au moment où l'image primitive n'était pas encore éteinte. Il a trouvé ainsi pour l'impression du charbon ardent $\frac{13}{100}$ de seconde.

Ce procédé ne donne pas une mesure absolue et totale de la persistance, et on ne peut en effet l'obtenir ; car une fois l'image formée dans l'œil, l'impression qui survit ne passe pas d'une manière continue du maximum au minimum, et elle s'affaiblit graduellement ; on ne peut donc avoir que le temps pendant lequel cette impression s'est maintenue sans perte sensible et non pas le temps qui sépare le moment où l'illumination cesse de celui où l'impression sur la rétine est prête à s'évanouir. L'analogie avec les effets de phosphorescence est encore ici manifeste.

M. Plateau (2) a cherché à modifier cette méthode en faisant usage

(1) *Mém. de l'Acad. des sciences*, t. 83, 1765.

(2) *Dissertation sur quelques propriétés des impressions produites sur la vue*, Liége, 1829. — Herschel, *Traité d'optique*, traduct. française, t. 2, p. 473. — *Bulletin de l'Acad. de Bruxelles*, t. 16. — *Ann. de chimie et de physique*, 2[e] série, t. 58, p. 337.

de disques à secteurs alternativement blancs et noirs, puis colorés de différentes manières; et, dans ce cas, il cherchait la vitesse nécessaire pour qu'avec un éclairage ordinaire la surface fût uniformément éclairée. Les disques que l'on peut mettre en mouvement paraissent avoir été employés pour la première fois par Musschenbroeck (1). M. Plateau a trouvé, de cette manière, des valeurs sensiblement égales pour les différentes lumières, valeur dont la moyenne est 0″,34 c'est-à-dire environ $\frac{1}{3}$ de seconde. Mais, d'après ce que l'on va voir, la persistance dépendant de l'intensité lumineuse, comme on ne connaît pas le rapport des intensités relatives aux différentes couleurs, on ne peut accorder beaucoup de confiance à ce résultat. En effet, le temps peut être beaucoup plus court, ou beaucoup plus long selon que l'intensité de la lumière objective est plus ou moins forte, et que l'on considère une intensité plus ou moins grande de l'image retinienne finale, pour déterminer la durée totale de l'impression.

Voici quelles sont les conclusions des expériences diverses faites par M. Plateau avec des disques à secteurs alternatifs :

1° L'intervalle de temps pendant lequel une impression se conserve sans perte sensible est d'autant plus grand que l'impression est moins intense.

2° Ce temps, pour l'impression produite sur un papier blanc éclairé par la lumière du jour, est moindre que $\frac{1}{1000}$ de seconde. Pour un papier jaune il est un peu plus grand que pour un blanc, pour un papier rouge il est plus grand encore, et plus grand encore pour un papier bleu.

3° La durée totale de l'impression paraît être d'autant plus grande que cette impression est plus intense.

4° La durée totale de l'impression est d'autant plus grande qu'on a regardé l'objet pendant un temps plus court, pourvu toutefois que ce temps soit suffisant pour développer une impression complète.

5° Lorsque l'impression provient d'un objet très-lumineux, tel que le soleil couchant ou même une fenêtre, elle passe ordinairement par une série de couleurs différentes (cet effet rentre dans les images accidentelles dont il sera question plus loin).

6° Enfin lorsque l'impression qui persiste sur la rétine provient d'un objet brillant, il arrive aussi quelquefois qu'elle disparaît et reparaît plusieurs fois avant de s'anéantir complétement.

(1) *Introduct. ad philos. natur.*, 1760.

On voit qu'entre autres conséquences, l'intensité lumineuse a une grande influence sur le phénomène de la persistance, et c'est en raison de cette circonstance que l'œil a le temps d'apprécier la forme d'une étincelle électrique dont la durée est très-faible, mais qui a une intensité considérable.

M. Aimé a imaginé une disposition ingénieuse pour l'étude de ces effets : concevons deux disques mobiles autour de leurs centres comme des roues, et placées sur un axe commun, mais disposés de façon à ce qu'on puisse les faire tourner en sens inverse avec une vitesse variable à volonté et égale pour les deux. L'un des disques est percé d'un certain nombre d'ouvertures en forme de secteurs étroits, égaux et symétriquement placés comme les rayons d'une roue ; l'autre ne présente qu'une ouverture égale à l'une des précédentes. Si l'appareil est placé devant une vive lumière, comme au volet d'une chambre noire, quand on mettra les roues en mouvement, l'œil étant placé dans la direction de l'axe, l'ouverture unique du second cercle se trouvera correspondre successivement à chacune des ouvertures du premier. Lorsque la vitesse de rotation est faible, l'effet produit doit être une succession de semblables apparences qui se montrent l'une après l'autre dans le sens du mouvement de l'ouverture unique, et qui disparaissent l'une après l'autre, de telle manière qu'on ne voit jamais qu'un secteur lumineux. Mais si la vitesse de rotation devient plus grande, l'impression produite sur la rétine ne sera pas encore éteinte lorsque la superposition suivante aura lieu, et l'on verra deux secteurs ; si la vitesse augmente encore on en verra trois, puis quatre, etc., et connaissant pour une vitesse donnée le nombre des secteurs aperçus simultanément, il sera aisé d'en déduire la valeur approchée de la durée de l'impression produite pour chacun d'eux; cette durée n'est relative qu'à une certaine limite d'intensité, bien entendu, car elle varie en raison des circonstances dans lesquelles se fait l'expérience, de l'intensité lumineuse, de la fatigue de l'œil, etc.

Des expériences analogues à celles de M. Plateau sur les disques rotatifs ont été faites par différents observateurs, et les résultats numériques obtenus varient; mais tous s'accordent pour reconnaître qu'en faisant usage de secteurs alternativement noirs et blancs, ou noirs et colorés, pour obtenir une teinte uniforme en les faisant tourner, la vitesse doit être d'autant plus grande que l'intensité lumineuse est plus forte, ce qui provient de ce que la persistance est d'autant plus grande que l'intensité lumineuse l'est elle-même davantage.

M. Plateau a fait une remarque intéressante consistant en ce que, si l'on change le rapport de grandeur des secteurs blancs et noirs sans changer leur nombre, à égalité d'éclairage, la vitesse nécessaire pour rendre l'impression uniforme ne change pas; ce résultat tient probablement à ce que dans les parties où les secteurs blancs sont plus larges, l'impression lumineuse est plus forte et diminue plus vite quand l'excitation cesse.

M. Helmholtz, en mesurant par ce procédé le temps que met un secteur blanc ou noir à passer pour produire une égale clarté sur le cercle, a trouvé $\frac{1}{24}$ de seconde pour une forte lampe et $\frac{1}{10}$ de seconde pour une lumière faible, ce temps variant avec l'intensité lumineuse comme on l'a vu.

Ces expériences à proprement parler ne permettent pas de mesurer la persistance, car elles ne donnent qu'une comparaison entre la période d'établissement de la sensation et les premiers instants de la période de diminution quand la lumière excitatrice vient à cesser d'agir. Elles conduisent néanmoins à cette conséquence que l'impression lumineuse momentanée ne dépend que de la quantité de lumière qui est tombée sur la rétine; cette impression est donc la même pour une lumière très-intense qui agit pendant un temps très-court que pour une faible lumière qui agit pendant plus longtemps, avec cette condition que la durée de cette action n'atteigne pas $\frac{1}{30}$ de seconde (1).

Il résulte de là que l'on n'a pas conscience des variations de la sensation qui se passent dans un temps inférieur à $\frac{1}{30}$ de seconde; d'un autre côté, comme on l'a déjà fait remarquer, la durée peut être suppléée par l'intensité, et c'est pour ce motif que l'on distingue les étincelles électriques, dont la durée ne dépasse pas $\frac{1}{100000}$ de seconde, et que l'on voit les objets éclairés par ces étincelles quand ils sont en mouvement : comme la portion de trajectoire que ces objets peuvent décrire pendant ce temps est excessivement courte (ce ne serait que 5 millimètres pour une balle de fusil lancée à une vitesse de 500 mètres par seconde), ces objets nous paraissent immobiles.

S'il s'agit d'objets se mouvant avec une vitesse beaucoup moindre, il en sera encore ainsi à plus forte raison, même si l'éclairement avait une durée beaucoup moins courte que celle de l'étincelle électrique. Cela posé, que l'on imagine une suite d'objets semblables, par exemple

(1) Helmholtz, *Optique physiologique*, p. 457.

les dents d'une roue, se suivant à des intervalles de temps parfaitement égaux, si l'on éclaire ces objets, ou simplement le champ sur lequel ils se projettent, par de la lumière intermittente dont les éclats se produisent à des intertervalles de temps égaux entre eux, trois cas pourront se présenter : ou bien l'intervalle des éclats sera égal à celui qui sépare les passages de deux dents consécutives, et, comme elles sont toutes semblables, elles paraîtront toujours dans la même position au moment de l'éclairement, la roue semblera immobile; ou bien les éclats seront plus rapprochés que le passage de deux dents consécutives, et alors la roue étant saisie par l'éclat lumineux avant d'avoir avancé d'une dent, il semblera qu'elle tourne en sens inverse de son mouvement réel; dans le troisième cas l'inverse aurait lieu, c'est-à-dire que si les éclats de la lumière intermittente étaient plus éloignés que les passages de deux dents consécutives de la roue, celle-ci paraîtrait tourner dans le sens même de sa rotation.

Cet emploi de l'éclairage intermittent a permis d'apprécier les vitesses de corps mobiles et réciproquement; c'est ainsi que M. Wheatstone, en éclairant avec des étincelles électriques le champ d'un microscope, a pu distinguer les organes mobiles des rotifères. D'un autre côté Savart (1) est l'un des premiers physiciens qui aient employé l'éclairage intermittent pour étudier la constitution des veines fluides. L'appareil dont il a fait usage consiste essentiellement en un large ruban dont la surface est partagée en bandes transversales alternativement blanches et noires et auquel on peut donner un mouvement rapide dans le sens de sa longueur. Le liquide étant supposé couler verticalement, on place le ruban mobile derrière la veine et dans une position parallèle à celle-ci; alors en imprimant à la bande un mouvement dont la rapidité soit suffisante, l'œil placé devant le système peut distinguer les diverses particularités que présente la veine, tels que les renflements annulaires qui se propagent le long de la portion de la veine contiguë à l'orifice. Cet effet est analogue à ceux qui se produisent quand deux roues tournent avec rapidité l'une derrière l'autre, dans des plans parallèles et rapprochés, et avec des vitesses égales de grandeur et de direction.

Le *thaumatrope* imaginé par le docteur Paris (2) est un petit rectangle de carton que l'on fait tourner autour d'un axe passant par les

(1) *Ann. de chim. et de phys.*, t. 53, p. 348, 1833.
(2) *Journal d'Édimbourg*, t. 7, p. 87. — *Ann. de Poggend.*, t. 10.

milieux des côtés les plus longs; cet axe est réalisé simplement par un fil dont on tient un bout dans chaque main en lui donnant un mouvement de torsion et de tension alternatives. Sur l'une des deux moitiés, d'un côté, on peint ordinairement une cage; sur l'autre moitié, de l'autre côté, est un oiseau; pendant la rotation l'oiseau paraît être dans la cage, en raison de la persistance des deux images dans les points occupés successivement par elles.

Dans le *phénakisticope*, inventé par M. Plateau (1) en même temps que les *disques stroboscopiques* de M. Stampfer qui produisent le même effet, on se sert de la persistance des impressions pour produire sur l'œil des illusions tendant à faire juger du mouvement de certaines figures. Étant données un certain nombre d'images, représentant par exemple les diverses positions successives du mouvement d'un homme qui frappe avec un marteau, si ces images sont rangées en cercle sur un disque de manière à venir occuper successivement la même place lorsqu'on donne à ce disque un mouvement assez rapide de rotation, et si on dispose tellement les choses que l'œil ne puisse voir ces images qu'au moment où elles occupent une place déterminée, il semble que ces figures passent d'une manière continue par tous les degrés de forme intermédiaires, et que par conséquent il y a un véritable mouvement du personnage. Il y a donc là en même temps qu'un effet de persistance une illusion du jugement, tenant à ce que l'on néglige, dans l'appréciation, la notion de l'intermittence de la vision, condition étrangère aux circonstances dans lesquelles se fait l'éducation du sens de la vue.

On réalise de différentes manières le principe fondamental de ces appareils: on peut se servir de deux disques parallèles placés à une distance assez grande pour que la lumière puisse venir éclairer fortement l'un d'eux sur lequel sont dessinées les figures; en face de celles-ci, sur l'autre disque, sont pratiquées d'étroites ouvertures par lesquelles l'œil de l'observateur les regarde; les deux disques sont animés d'un même mouvement de rotation. On peut aussi n'employer qu'un seul disque qui porte à la fois les ouvertures et les figures, qui sont alors vues par réflexion sur un miroir.

Comme instruments fondés sur la persistance des images sur la rétine,

(1) *Correspondance math. et phys. de Bruxelles*, t. 4, p. 393, 1828; t. 6, p. 121, 1830; t. 7, p. 365. — *Ann. de chimie et de phys.*, 2[e] série, t. 53, p. 304.

on peut citer encore l'*anorthoscope* de M. Plateau (1) et le *dedaleum* de M. Hörner (2) : dans ce dernier appareil on obtient les illusions du phénakisticope, en faisant tourner un cylindre creux de 20 cent. de diamètre environ, à l'intérieur duquel sont dessinées les figures ; à chacune de celles-ci correspond une ouverture diamétralement opposée par laquelle on regarde.

§ 3. *Images accidentelles.*

On a vu dans le paragraphe précédent qu'après avoir regardé fixement un objet lumineux, si l'on vient à fermer subitement les yeux l'image persiste pendant quelque temps ; mais elle ne tarde pas à diminuer d'intensité et même à changer de couleur de façon à présenter la couleur complémentaire de l'objet, et l'on peut avoir ainsi plusieurs alternatives d'intensité et de coloration suivant la couleur de l'objet, l'intensité de son éclat et la durée pendant laquelle l'image objective a impressionné la rétine. Ces effets, qui succèdent à la persistance, dépendent de ce que l'on a nommé les *images accidentelles*.

On peut les voir également après l'action lumineuse en portant les yeux sur une surface éclairée : ainsi, en regardant fixement un objet coloré sur un fond noir, on voit au bout de quelque temps la couleur de cet objet perdre peu à peu de son éclat; si alors on porte les yeux sur une surface blanche, comme le plafond de la chambre où l'on se trouve, on voit paraître une image de même forme que l'objet, mais d'une couleur complémentaire. Si l'objet est une feuille de papier rouge il donne naissance à une image de couleur complémentaire ou verte ; réciproquement, en fixant un objet ou une feuille de papier verte, on voit une image accidentelle rouge. Si l'objet est jaune ou bleu l'image sera violette ou orangée, et vice versa.

La disparition de ces images n'a pas lieu en général par un changement graduel et continu ; elles offrent des alternatives d'intensité et de colorations diverses, car on voit quelquefois reparaître à plusieurs reprises l'image primitive.

Si l'on n'a pas égard à la couleur des images, mais seulement à leur intensité, on désigne sous le nom d'*images négatives* celles dont l'in-

(1) *Bullet. de l'Acad. de Bruxelles*, t. 3. — *Ann. de Poggend.*, t. 37, p. 464.
(2) *Ann. de Pogg.*, t. 32, p. 650.

tensité est plus faible que l'intensité du champ éclairé qui les entoure, par opposition aux *images positives* dans lesquelles l'intensité est plus grande que celle des parties voisines. Quand, dans la première expérience, après l'action de la lumière objective, on admet dans l'œil une lumière d'une intensité convenable, l'image persistante, qui était positive, devient négative, et il se produit des alternatives d'intensité en même temps que des changements de coloration.

Les effets de même genre qui ont lieu quand les yeux sont fermés ne doivent pas être considérés comme se produisant exclusivement par suite d'une excitation limitée aux contours de l'image objective, car les paupières laissent toujours passer une certaine quantité de rayons, et même en l'absence de ceux-ci, dans la chambre noire, il reste encore l'excitation interne à laquelle on a donné le nom de lumière propre de la rétine et dont on a déjà parlé page 325.

Ces effets d'éclairement sont variables avec certaines causes peu appréciables, telles que la pression plus ou moins forte des paupières, des mouvements communiqués au globe de l'œil, des pressions extérieures, certains mouvements du corps, et peuvent donner lieu à des alternatives d'images accidentelles positives ou négatives diversement colorées.

Si, dans les expériences indiquées plus haut, au lieu de porter les yeux sur un écran blanc, après avoir observé pendant quelque temps un objet éclairé, on fixe les regards sur une surface colorée, alors les couleurs accidentelles se combinent avec les couleurs réelles, c'est-à-dire que du rouge accidentel sur une surface bleue donne du violet, etc. Mais il y a ici une question d'intensité et de vivacité de nuance qui peut dépendre des couleurs en présence, en donnant lieu à des effets de contraste dont on parlera dans le paragraphe suivant. On doit dire également que l'image accidentelle peut paraître plus ou moins grande selon la distance de la surface sur laquelle on la projette, ce qui est aisé à comprendre; en outre les bords en sont plus ou moins tranchés, comme si par irradiation la sensation s'étendait au delà des limites de l'image réelle.

Les apparences des diverses intensités des images accidentelles paraissent avoir été observées, il y a plus de deux siècles, par Peiresc (1), et ont donné lieu à des observations intéressantes de divers physiciens;

(1) *Vita*, p. 175 (1634). — Helmholtz, *Optique physiologique*, p. 506.

Jurin (1), un siècle après, en donna une théorie qui a de l'analogie avec celle de M. Plateau dont il va être question plus loin; Buffon (2) décrivit ces phénomènes d'une manière assez complète et le père Scherffer (3) les attribua à une diminution de sensibilité de la rétine, explication qui forme la base de celle de M. Fechner. On peut citer encore quelques observations intéressantes faites par Rozier (4) et se rapportant à la succession des images accidentelles après une seule impression de la rétine. Depuis, elles ont fait l'objet de nombreuses études parmi lesquelles on doit distinguer les travaux de M. Plateau (5) et ceux de M. Fechner (6) comme résumant les opinions principales entre lesquelles les physiciens se trouvent partagés.

M. Plateau, en comparant les impressions accidentelles aux impressions réelles correspondantes, admet qu'elles doivent être regardées comme d'une nature opposée à la première; ainsi, d'après lui, les impressions sur la rétine données par deux couleurs complémentaires seraient dues à des mouvements opposés transmis à notre œil. Il se fonde sur différents effets et entre autres sur les suivants :

1° Les teintes de deux couleurs complémentaires se neutralisent en formant du blanc, mais, dans le cas d'une impression réelle et d'une impression accidentelle correspondante, cette opposition peut produire du noir, car, suivant ses recherches, si l'on projette une image accidentelle sur une surface dont la couleur est complémentaire de la sienne, l'image ne paraît que d'un gris foncé comme si la sensation était en partie détruite en cet endroit.

2° Tandis que deux couleurs réelles complémentaires produisent du blanc par leur combinaison, deux couleurs accidentelles complémentaires produisent du noir.

Ainsi, suivant cette manière de voir, quand la rétine est subitement soustraite à l'action émanée de l'objet coloré, l'état d'excitation de l'organe dans les parties frappées par la lumière et à une certaine distance en vertu de l'irradiation, persévère d'abord sans changer de nature; mais

(1) *Smith's optics*, Cambridge, 1738.
(2) *Mémoires de l'Acad. des sciences*, t. 61 (1743).
(3) *Journal p physique*, t. 26 (1785).
(4) *Journal de physique*, t. 6, p. 486.
(5) *Essai d'une théorie générale comprenant les apparences visuelles*, Bruxelles, 1834). — *Ann. de chim. et de physique*, 2e série, t. 53, et t. 58. — Herschel, *traité d'optique*, traduction française, t. 2, p. 490.
(6) *Ann. de poggend.*, tomes 44, 45 et 50.

bientôt cet état fait place à un état opposé d'où résulte l'image accidentelle. Cette sensation atteint son maximum, s'affaiblit à son tour en présentant ordinairement une marche oscillatoire, car, d'après ce que l'on a dit, elle peut présenter des passages de la couleur primitive à la couleur complémentaire.

M. Plateau voit donc une grande analogie entre ces phénomènes et le mouvement d'un corps écarté d'une position d'équilibre stable et qui y revient par un mouvement oscillatoire. Cette théorie est ingénieuse et appuyée par des expériences nombreuses et bien conçues; mais comment admettre que deux lumières de couleurs complémentaires donnent des activités oposées à la rétine? Lorsque la rétine perçoit la sensation colorée due à une image accidentelle, l'impression doit être la même que si la rétine était frappée par les rayons colorés de cette nuance; or il est bien difficile d'admettre que des rayons colorés, qui diffèrent seulement par leur longueur d'onde, donnent lieu à deux mouvements opposés ou à deux activités opposées sur la rétine.

L'hypothèse du père Scherffer, étendue par M. Fechner, est basée également sur une modification physique de la rétine : elle consiste à supposer que la rétine excitée fortement par une lumière colorée déterminée, éprouve une certaine fatigue et est momentanément moins impressionnable sous l'action de cette lumière que sous l'influence des autres rayons; la théorie d'Young sur le mécanisme de la sensation des couleurs dont on a parlé antérieurement page 337 en rend aisément compte, mais on peut également le concevoir sans admettre des fibres nerveuses différentes pour l'appréciation des couleurs.

D'après cette hypothèse, on explique aisément les images accidentelles que l'on voit quand ayant fixé un objet lumineux on jette les yeux sur un champ blanc ou coloré; en effet, l'œil percevant mieux les rayons autres que ceux qui l'ont impressionné primitivement, voit principalement ceux qui, réunis aux premiers, forment du blanc, par conséquent voit la couleur complémentaire. On peut aussi comprendre l'alternative de ces images colorées; mais comment expliquer les images accidentelles quand, ayant fixé un objet coloré, on se trouve dans l'obscurité? M. Plateau croyait que cette objection était une des plus graves que l'on pût faire à cette explication : mais d'abord, comme on vient de le dire page précédente, on ne peut considérer le champ visuel comme privé d'excitation, et, d'un autre côté, il faut se rappeler les phénomènes de persistance dont il a été question précédemment, page 351 ; comme

dans une certaine limite la durée totale de l'impression paraît être d'autant plus grande qu'on a regardé un objet lumineux pendant un temps plus court, si l'organe a été fortement impressionné par une lumière dans laquelle les rayons colorés sont inégalement répartis, les rayons de couleur complémentaires à ceux qui existaient en plus grande quantité doivent donner une persistance plus grande, l'œil étant fatigué pour la perception des autres. Ainsi la fatigue momentanée de la rétine jointe aux effets de persistance et d'excitation des diverses parties de l'organe de la vue donneraient lieu aux images accidentelles que l'on perçoit dans les diverses circonstances des expériences.

Cette théorie paraît donner, du reste, l'explication du plus grand nombre de faits observés et semble préférable à celle de M. Plateau ; ainsi que le remarque M. Helmholtz, il se rencontre bien quelques phénomènes dont on ne peut encore rendre compte d'une manière complétement satisfaisante, mais néanmoins ce physiologiste n'a pu en trouver qui fussent incompatibles avec les principes qui viennent d'être énoncés.

§ 4. *Contraste. Contraste simultané; contraste successif.*

Lorsque deux images colorées sont près l'une de l'autre, leur juxtaposition a pour résultat de faire paraître plus sombres les parties voisines des espaces clairs, et réciproquement, ou bien de donner aux couleurs voisines une teinte complémentaire de celle de l'objet examiné.

Cette influence du voisinage des couleurs était déjà connue de Léonard de Vinci (1), et depuis deux siècles un grand nombre de savants se sont livrés à des recherches très-intéressantes sur les effets qu'elle produisait et sur l'explication qu'on pouvait en donner. Rumfort (2), entre autres, à la fin du siècle dernier, décrivit les effets des ombres colorées dont il va être question ci-après ; Prieur (3), dans les études auxquelles il se livra, réunit les phénomènes sous la dénomination d'effets de *contraste* qu'ils ont aujourd'hui, et M. Chevreul (4) donna une description exacte des modifications que subissent les différentes couleurs par leur

(1) *Trattato della pittura.* — Helmholtz, *Optique phys.*, p. 545.
(2) *Philosoph. transact.*, t. 84, p. 107 (1794).
(3) *Ann. de chimie*, t. 54 (1805).
(4) *Mém. de l'Acad. des sciences*, t. 11, 1832; *de la loi du contraste simultané des couleurs* (1839). — *Comptes rendus*, t. 47 (1858).

juxtaposition, et classa les divers phénomènes qui se rapportent à l'étude de cette question. M. Chevreul a distingué les effets de *contraste simultané* des effets de *contraste successif* et même des effets de *contraste mixte;* mais ces derniers effets rentrent dans les phénomènes des images accidentelles, et l'on doit surtout examiner ici ceux qui dépendent du contraste simultané.

Avant d'indiquer quelle peut être la cause des effets dont il s'agit, il faut exposer les circonstances principales dans lesquelles on les observe.

Un des effets les plus favorables pour la vivacité du contraste est le phénomène des ombres colorées observé par Rumfort. On a déjà vu dans le tome I[er], page 99, quel était le procédé employé par Rumfort pour comparer les intensités lumineuses de deux lumières différentes : Une

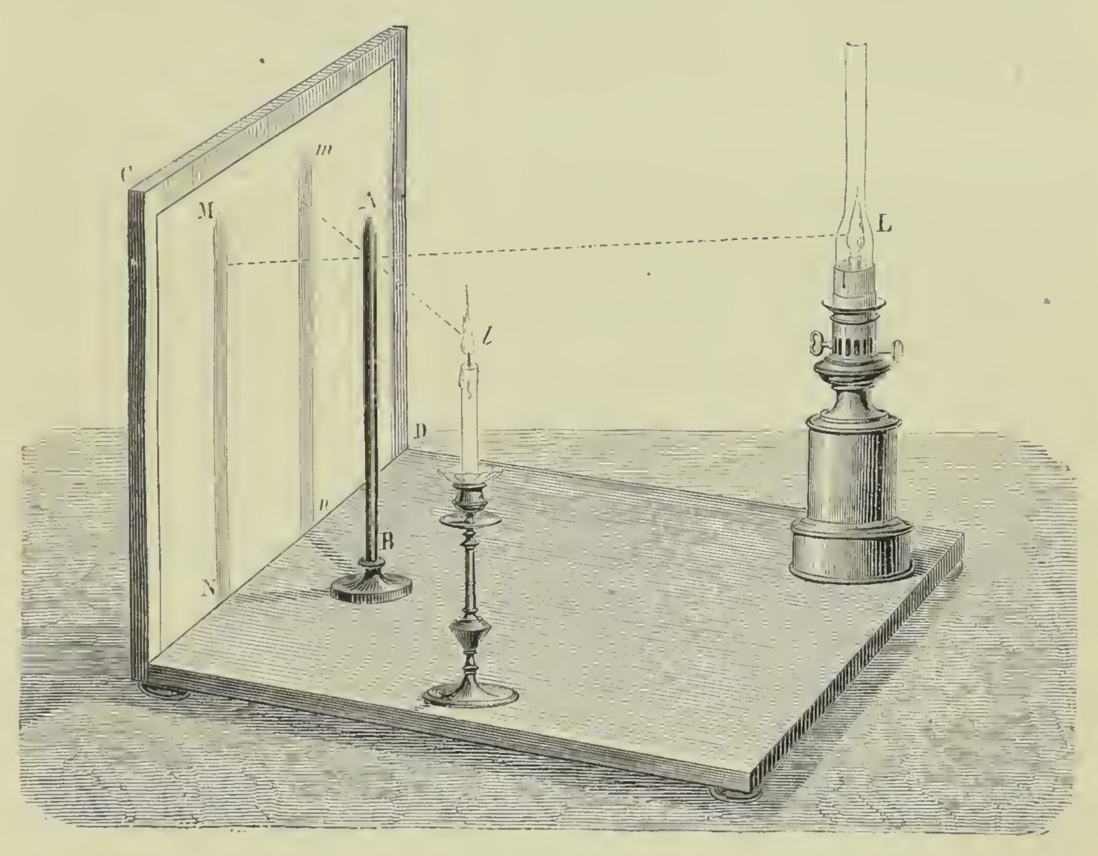


Fig. 5.

lampe L et une bougie l étant devant un écran en papier CD dans une chambre obscure, on place une tige opaque AB et l'on dispose les deux lumières de manière à projeter sur l'écran deux ombres MN, mn, très-rapprochées l'une de l'autre, de façon à ce que l'inclinaison des rayons incidents lAm, LAM, soit la même. On recule alors la flamme la plus

vive L, ou l'on approche celle qui l'est moins, jusqu'à ce que les deux ombres paraissent de même intensité; si l'on remarque que l'ombre de chaque lumière est éclairée par l'autre , et que le reste de l'écran reçoit la somme des clartés des deux lumières, on voit que l'égalité des ombres indique l'instant où chaque lumière donne la même clarté à une même surface de l'écran. Mais ce qu'il y a de remarquable au point de vue des phénomènes qui nous occupent ici, c'est que s'il existe la moindre différence dans la couleur des deux lumières elle apparaît immédiatement; si l'une d'elles, la bougie l par exemple, est jaunâtre, l'ombre MN offre cette teinte jaune, mais en outre mn apparaît colorée de la couleur complémentaire de celle du fond qui est un mélange des deux lumières, et cette teinte de mn est bleuâtre.

On peut aisément, à la place d'une des deux lumières, employer la lumière du jour ou un faisceau de rayons solaires introduit dans la chambre noire, et les effets sont très-tranchés. Lorsque l'on place devant une des lumières L ou l un verre coloré en rouge, son ombre paraît aussitôt verte; si le verre est jaune la couleur de l'ombre devient bleue, mais il faut pour que les colorations présentent la plus grande netteté qu'on égalise l'intensité des deux sources lumineuses que les deux ombres paraissent également sombres. Ces effets sont très-remarquables, et l'influence d'une couleur pour nous donner le sentiment de la couleur complémentaire est ici très-nettement manifeste.

Prieur employait la disposition suivante pour observer des effets de contraste : il plaçait entre une fenêtre et l'œil un morceau de papier coloré possédant une certaine transparence, et il appliquait sur le papier une petite bande de carton blanc; elle paraissait teinte de la couleur complémentaire du papier. Ainsi la bande de carton paraissait rose sur un papier vert, lilas sur un papier jaune, etc.

On peut encore faire usage du procédé suivant qui est très-simple : on forme des raies noires ou des taches noires, cercles ou carrés, avec de l'encre, sur des papiers de couleur, rouges, verts, jaunes, etc.; puis, on place sur ces papiers une feuille de papier mince translucide et on examine au jour l'ensemble de ces surfaces.

Le papier translucide donne de l'égalité de ton aux images en répandant une certaine quantité de lumière blanche; sur les parties noires le fond du papier paraît alors légèrement nuancé de la couleur du papier coloré qui est vu par transmission, mais les barres et les taches

sont vues avec la couleur complémentaire. Ainsi, sur un papier rouge, ces raies ou ces taches paraissent vertes ; sur un papier bleu elles semblent jaunes, etc.

M. Chevreul a prouvé d'une manière générale que cette modification dans la perception des images colorées est réciproque, c'est-à-dire que lorsqu'on voit simultanément deux objets colorés dans le voisinage l'un de l'autre, les deux couleurs semblent réagir mutuellement de manière qu'à chacune d'elles s'ajoute la complémentaire de l'autre. Voici le procédé qu'il a employé pour faire cette démonstration : on place sur une feuille de papier ou de carton deux bandes de papier ou d'étoffe teintes des deux couleurs que l'on veut soumettre à l'observation; l'une par exemple est rouge, l'autre jaune ; ces deux bandes doivent avoir 12 millimètres de largeur et 60 millimètres de longueur. On place parallèlement à l'une de ces bandes, et à la distance d'un millimètre, une seconde bande qui lui soit identique en dimension et en couleur, et qui est destinée servir de terme de comparaison; on dispo parallèlement à l'autre bande et à la même distance d'un millimètre, une bande qui lui soit également identique et l'on a ainsi quatre bandes colorées : deux d'une couleur d'un côté du carton, à droite de la ligne médiane, par exemple, et les deux autres de l'autre côté à gauche. Les deux bandes intérieures se touchent par leur plus grand côté, et la ligne de contact forme la ligne médiane; elles ont des couleurs différentes et c'est sur elles que l'on observe l'action mutuelle des deux couleurs.

Il suffit pour juger de l'effet de regarder la surface à la distance de la vision distincte dans un certain sens par rapport à la lumière incidente pendant quelques secondes. Le contraste qui échapperait dans les circonstances ordinaires, devient presque toujours appréciable à l'aide des deux bandes extrêmes servant de termes de comparaison. Ainsi, avec les bandes rouges et jaunes, la bande rouge intérieure deviendra un peu violette et la bande jaune contiguë paraîtra verdâtre.

Le principe général que M. Chevreul a déduit de ses nombreuses expériences consiste en ce que quand deux couleurs juxtaposées sont vues simultanément, elles s'influencent mutuellement de sorte qu'à chacune d'elles s'ajoute le complémentaire de l'autre. Il est facile alors de rendre compte des différents effets observés dans les conditions suivantes :

1° Lorsque les deux couleurs sont complémentaires l'une de l'autre, comme le rouge et le vert, le jaune et le violet, elles s'avivent par la juxtaposition et acquièrent de l'éclat.

2° Quand on juxtapose une couleur quelconque avec une surface blanche, cette dernière se teint de la couleur complémentaire ; en même temps la couleur employée devient plus brillante et plus foncée, car la complémentaire du blanc étant le noir, d'après le principe énoncé la couleur employée doit devenir plus sombre. Exemple : par la juxtaposition du rouge avec le blanc ce dernier prend une teinte légèrement verdâtre et le rouge devient plus sombre.

3° Si l'on juxtapose une couleur avec une surface noire, cette dernière prend d'une manière plus ou moins prononcée une légère teinte complémentaire, mais cette couleur employée devient plus brillante et plus claire ; car la complémentaire du noir est le blanc qui se réunit à la couleur employée pour produire cet effet.

4° En vertu du même principe, si dans les deux couleurs juxtaposées il y a une couleur commune aux deux, elle tend à s'affaiblir.

Le blanc et le noir éprouvent aussi par leur juxtaposition une modification réciproque, le premier devenant plus éclatant et le second plus sombre.

De même si deux objets voisins diffèrent en clarté, cette différence paraît en général augmentée par leur voisinage ; on peut donc aisément comprendre que des objets faiblement éclairés peuvent disparaître complétement lorsque leur image se peint sur la rétine dans le voisinage d'une partie fortement éclairée par un objet brillant.

On peut se rendre compte d'un effet curieux observé lorsqu'on superpose par gradins des bandes de papier colorées par teintes plates avec de l'encre de Chine et de façon que la coloration aille en croissant de l'une à l'autre.

En éclairant la surface totale, l'intensité de la lumière est évidemment la même dans toute l'étendue de chaque bande ; cependant chacune d'elles, par contraste, paraît plus foncée sur le bord qui touche à une bande plus claire, et plus claire sur le bord en contact avec une bande plus foncée, de sorte que l'ensemble donne par illusion une apparence de cannelure aux différentes bandes (1).

Les observations de M. Chevreul ont montré que les modifications mutuelles des couleurs ne sont pas bornées au cas où les objets colorés sont contigus l'un à l'autre ; il a prouvé qu'on pouvait les rendre sensibles même quand ils sont séparés par un intervalle de 5 centimètres,

(1) Chevreul, *Contraste simultané*, planche 1, fig. 3.

mais alors l'intensité de l'effet est d'autant moindre que la distance est plus grande.

Ces effets se produisent dans un grand nombre de circonstances ; ainsi quand un appartement, dont les murs sont revêtus d'une couleur vive, est éclairé par le soleil, les parties de l'ameublement éclairées par diffusion semblent se teindre d'une couleur complémentaire de celle des murs. De même quand on imprime des dessins sur des étoffes ou des papiers colorés, la couleur de ces dessins est ordinairement modifiée par la couleur complémentaire de celle du fond; par les mêmes motifs, si l'on veut produire des dessins blancs sur des fonds colorés, par exemple sur fond vert, il faut que les dessins soient légèrement verdâtres pour former du gris en neutralisant la couleur complémentaire rose que le fond donnerait par contraste; car, si ces dessins étaient blancs en réalité, ils paraîtraient roses.

M. Chevreul a montré comment toutes ces observations sur les sensations chromatiques pouvaient être utilisées dans les arts pour faire valoir les tons des couleurs employées dans la peinture ou dans les étoffes.

On a dit précédemment que si, au lieu d'examiner les effets produits par la vision simultanée d'objets colorés, on portait successivement les yeux sur des fonds de diverses couleurs, on pouvait observer des changements dépendant des images accidentelles et rentrant dans les phénomènes de *contraste successifs*. En effet, si l'on regarde par exemple pendant longtemps une couleur rouge éclatante fixée sur une large surface, on voit à mesure que l'œil se fatigue la couleur se ternir et faire place à une nuance briquetée différente de la première. Cet effet est dû à la disposition que l'œil prend à voir la couleur verte complémentaire du rouge comme on l'a dit antérieurement, page 356; car cette couleur, s'ajoutant au rouge par contraste, donne la nuance briquetée. On peut remarquer du reste que les colorations par contraste dans les images accidentelles sont très-vives.

On comprend aisément comment les couleurs des objets doivent varier quand, au lieu de les éclairer avec la lumière blanche, on se sert de lumières artificielles colorées différemment : la composition de la lumière incidente influe d'abord, car les divers rayons colorés diffusés par les objets sont alors en plus ou moins grande proportion ; mais, en outre, les corps qui entourent ces objets changeant de nuances par les mêmes motifs, l'effet du contraste des couleurs peut devenir

différent de ce qu'il était avec la lumière blanche. En général plus on se rapprochera d'une lumière ayant moins de rayons de diverses réfrangibilités, plus les couleurs des objets auront de tendance à se rapprocher les unes des autres. C'est ainsi que les tons bleus et verts sont moins différents à la lumière du gaz ou des lampes qu'à la lumière blanche (1).

Pour expliquer tous ces phénomènes, on a supposé soit une modification physique de la rétine, c'est-à-dire une altération de la sensation, soit une différence dans l'appréciation. M. Plateau (2), qui admet le premier genre d'action, a rattaché les phénomènes de contraste à sa théorie des couleurs accidentelles; la rétine, suivant lui, pourrait, à distance comme après des temps différents, osciller entre des états d'excitation contraires : dans le voisinage immédiat de la partie excitée se présenterait une phase semblable donnant lieu aux effets d'irradiation, mais à une distance plus grande la phase contraire donnerait lieu au contraste. Cependant il n'a pas rejeté complétement l'intervention du contraste ou de l'influence exercée l'une sur l'autre par deux couleurs voisines ; il pense que cette influence, dans certains cas, peut accroître les effets observés.

L'autre hypothèse, dont l'idée est due à Prieur (3), consiste à admettre sous le nom de *contraste* une cause morale faisant ressortir ce que deux couleurs mises en présence ont de dissemblable en affaiblissant le sentiment de ce qu'elles ont de commun. M. Helmholtz admet cette manière de voir (4) et il pense même que l'habitude dans l'appréciation des couleurs doit exercer une grande influence sur les effets observés, de sorte que le contraste doit présenter moins de vivacité à des yeux exercés qu'aux yeux qui ne le sont pas. Toutes ses expériences l'ont conduit à cette conclusion que l'appréciation des couleurs, dans les phénomènes de contraste simultané, provient d'un acte du jugement, bien qu'on ne puisse pas en donner jusqu'ici de preuve satisfaisante.

(1) Voir Chevreul, ouvrage cité précédemment, et *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, t. 62, p. 93.

(2) *Ann. de chim. et de physique*, 2e série, t. 58. —Herschel, *Traité d'optique*, trad. franç., t. 2, p. 513.

(3) *Ann. de chim.*, t. 54, *Mém.* cité plus haut.

(4) *Optique physiologique*, p. 510.

§ 5. Vision binoculaire. Stéréoscope; Pseudoscope.

Les phénomènes visuels viennent d'être étudiés indépendamment du concours des deux yeux; il faut examiner maintenant quelle peut être l'influence de l'action simultanée de ces organes. N'ayant en vue dans cet ouvrage que les effets de la lumière, il n'a pas été question des sujets relatifs à la marche des rayons lumineux ainsi qu'à la direction de l'axe visuel; néanmoins il est utile, pour terminer ce sujet, de parler de quelques-uns des phénomènes les plus intéressants qui se rapportent à la vision binoculaire.

Cette partie de l'optique a été le sujet de nombreux travaux de la part des physiciens et des physiologistes sans que l'on puisse donner avec certitude la solution des questions qui s'y rapportent. On a fait plusieurs hypothèses depuis Galien (1) pour expliquer la vision simple avec les deux yeux; ainsi on a admis une réunion dans l'encéphale de fibres nerveuses provenant de points correspondants des deux rétines; on a supposé que l'on ne voit successivement qu'avec un seul œil; enfin, ce qui paraît le plus probable, on a pensé que la vision simple dépendait de la manière dont nous interprétions nos sensations visuelles.

Mais avant de donner plus de détails sur ce point, il est nécessaire de décrire le *stéréoscope* dont la découverte est due à M. Wheatstone (2), car les expériences que l'on peut faire au moyen de cet appareil, ainsi que la combinaison des couleurs vues séparément avec chacun des yeux, permettent de mieux apprécier les différentes circonstances de la vision binoculaire.

Si l'on est placé à quelque distance d'un objet, d'un cube par exemple, et qu'on le regarde successivement avec l'œil droit et avec l'œil gauche, on ne percevra pas, dans les deux cas, la même projection, car on voit l'objet dans le premier cas un peu plus à droite et dans le second un peu plus à gauche. Supposons donc que l'on dessine sur deux feuilles de papier les deux projections planes de l'objet et que l'on puisse faire en sorte que chacun des yeux ne voie que la projection qui lui convienne; alors l'observateur percevra une seule image, mais avec la sensation du relief. L'appareil découvert par M. Wheatstone

(1) Helmholtz, *Optique physiolog.*, p. 959.

(2) *Ann. de chimie et de physique*, 2me série, t. 2, p. 330. — *Philosoph. transact.* 1838, partie 2.

réalise une disposition qui permet d'atteindre ce but : deux glaces inclinées à 45° sur un plan perpendiculaire à l'axe qui joint les deux yeux sont juxtaposées de façon qu'on puisse approcher les yeux de leur arête commune; il est évident alors que le miroir de droite ne donnera que des rayons qui seront vus par l'œil droit et le miroir de gauche des rayons arrivant dans l'œil gauche. On place alors les deux images qui portent les projections différentes d'un même objet en face des deux miroirs, on incline ou en approche plus ou moins ces images, et en cherchant la position qui leur convient pour que les axes optiques correspondant aux mêmes points viennent converger à la distance de la vision distincte, on ne voit qu'une seule image provenant des deux images différentes, chacune d'elles étant perçue simultanément par chacun des yeux; mais cette image donne la sensation du relief.

Non-seulement on peut voir en relief de cette manière des figures de géométrie même très-compliquées, et dans ce cas les effets de reliefs sont très-saisissants, mais encore on peut représenter des vues, des paysages, etc.; alors, pour obtenir les deux images de ces objets dans les positions convenables, on se sert d'images photographiques prises à la fois avec une chambre noire à deux objectifs, de façon à ce que chaque image soit la projection que chacun des organes doit examiner, ou bien l'on fait usage d'épreuves obtenues avec un seul objectif placé successivement dans deux positions différentes.

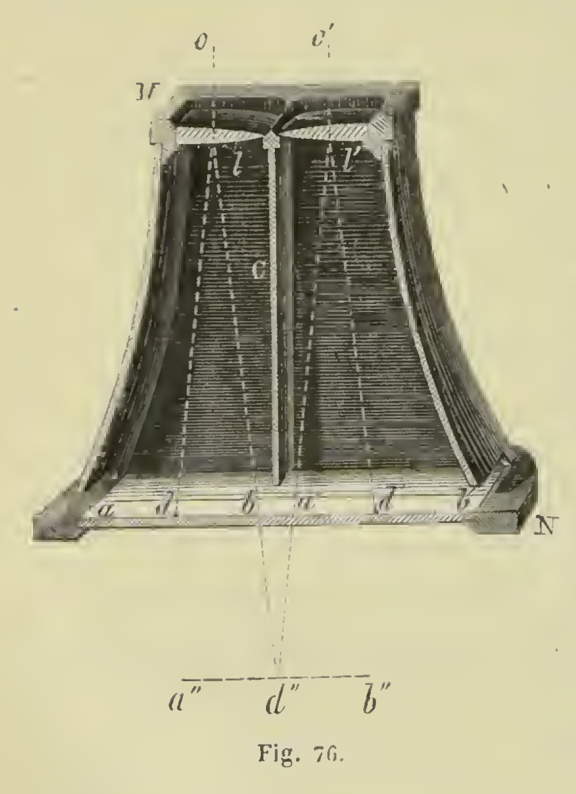


Fig. 76.

Brewster (1) a donné au stéréoscope une forme assez commode et généralement employée aujourd'hui : cet appareil, représenté fig. 76, consiste en deux prismes à surfaces convexes l, l', obtenus en coupant en deux parties une lentille convexe de 18 centimètres de distance focale, et disposés de façon à ce que leur partie la plus étroite se trouve en contact. Ces prismes lenticulaires sont fixés à la partie supérieure d'une caisse MN de 15

(1) Helmholtz, *Optique physiolog.*, page 811 et suivantes.

cent. de hauteur environ séparée en deux parties par une cloison C. Les deux images planes, placées en ab, a'b', sont vues la première par l'œil gauche en o, la seconde en o' par l'œil droit ; l'effet des deux prismes est de faire voir les images ab, a'b', en a''b'', les rayons émanés des points d et d' symétriques de l'image, éprouvant une réfraction qui leur donne la direction obd'', o'a'd'', et la position de a''b'' étant celle du foyer conjugé de ab ou de a'b' par rapport aux lentilles. l, l'. On a aisément ainsi la sensation d'une seule image en relief au lieu de celle de deux images planes vues séparément. Les dessins sont introduits par des fentes ménagées sur le côté de l'appareil en a et b' et sont vus soit par diffusion, soit par transparence ; dans ce dernier cas, on place en dessous de aba'b' une plaque de verre dépoli qui permet d'éclairer les images au travers des papiers ou des glaces sur lesquelles elles sont représentées.

Souvent les prismes lenticulaires l, l' sont placés dans des montures en cuivre fixées à la partie supérieure du stéréoscope et s'écartent ou se rapprochent l'une de l'autre selon l'écartement des yeux ; elles peuvent également s'approcher plus ou moins des images suivant la distance de la vision distincte de l'observateur ; on a même changé la distance focale des lentilles de manière à amplifier les images. Ces diverses dispositions peuvent être utiles selon les circonstances.

Comme les images stéréoscopiques sont répandues de tous côtés et surtout les photographies stéréoscopiques, il n'est pas nécessaire d'insister ici sur les effets surprenants qu'elles donnent ; la vivacité avec laquelle elles représentent les reliefs est tellement frappante comme dans les paysages, les monuments, les glaciers, etc., que, lorsqu'on voit en réalité les objets, on n'acquiert, sous le rapport de la forme, aucune notion nouvelle plus exacte que celle que l'on possédait déjà.

On a beaucoup multiplié les dispositions des appareils basés sur la perception simultanée d'images différentes par les yeux de façon à faire naître diverses illusions : tels sont le *pseudoscope* qui renverse le relief stéréoscopique ; le *télestéréoscope* qui exagère le relief des objets, lesquels à cause de leur grande distance ne donnent pas d'effet stéréoscopique ; et d'autres encore.

On a appliqué les principes stéréoscopiques au microscope, ainsi qu'à l'ophthalmoscope, comme on l'a vu antérieurement, page 319 ; on a également représenté par projection des images planes qui au moyen de dispositions convenables peuvent donner la sensation de re-

lief. On peut consulter sur ce sujet les ouvrages où se trouvent décrits les procédés à l'aide desquels on obtient ces diverses illusions d'optique (1).

Parmi les expériences que l'on doit prendre en considération quand on cherche à se rendre compte des effets de la vision binoculaire, ainsi que de la perception des couleurs, on peut citer celles dont la première idée est due à Dutour (2); elles consistent à impressionner simultanément chaque rétine d'un observateur par des rayons lumineux de couleur différente. On peut, pour arriver à ce but, regarder une surface blanche en plaçant devant chaque œil un verre coloré de diverses teintes, ce qui s'exécute aisément à l'aide de lunettes besicles ayant des verres de différentes couleurs. Au lieu d'opérer ainsi on peut peindre sur deux cartons deux cercles égaux de teintes dissemblables et les observer dans le stéréoscope; les résultats sont les mêmes, c'est-à-dire que dans ces divers modes d'expérimentation les deux champs visuels sont simultanément éclairés par des rayons diversement colorés.

L'impression ressentie par les observateurs n'a pas toujours été la même, ce qui montre que ce fait présente des différences individuelles considérables : un certain nombre d'expérimentateurs, et c'est le plus grand nombre, voient dans ce cas le champ coloré avec la couleur résultant du mélange des deux, non-seulement pour des couleurs faibles, mais encore pour des couleurs vives, et dans le cas où les couleurs sont complémentaires, ils ont la sensation du blanc. D'autres voient une alternance des deux couleurs, qui a lieu d'abord au commencement de l'expérience, puis qui s'atténue quand on prolonge l'observation et qui reparaît après, alternance indiquant que la vision de chaque œil l'emporte successivement. Quelquefois la superposition des impressions différentes n'a pas lieu dans tout le champ de la vision; une des teintes qui prédomine semble parsemée de taches offrant la couleur des rayons lumineux qui affectent l'autre œil, ce qui montre que les différents points des rétines ne sont pas, à ce moment, également sensibles.

Ces expériences semblent être favorables à l'hypothèse d'après la-

(1) *Transact. philos. d'Édimbourg*, t. 15. — *Journal d'Édimbourg*, t. 48, p. 150. — *Journal l'Institut*, n° 850, p. 128 (1850). — *Comptes rendus de l'Académie des sciences de l'Institut de France*, t. 31, p. 895. — *Bullet. de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, 1851, p. 45. Giraud-Teulon, *vision binoculaire*.

(2) *Mém. des savants étrangers*, t. 3, p. 514. *Id.*, t. 4, p. 511.

quelle on considère les fibres nerveuses émanées de parties correspondantes des rétines des deux yeux comme aboutissant au même point de l'encéphale, c'est-à-dire que les filets nerveux seraient constitués par paires semblables aboutissant à des points correspondants des rétines. Il y a un fait physiologique qui semblerait encore venir à l'appui de cette opinion : c'est une espèce de fatigue ou de paralysie momentanée de la rétine, par moitié et de même côté pour chaque œil, de droite ou de gauche simultanément, en sorte que les personnes qui en sont atteintes momentanément ne voient que la moitié droite ou la moitié gauche des objets. Cette hypothèse a été combattue dans ces dernières années en se basant surtout sur les effets de la vision stéréoscopique, car l'impression d'un seul objet résulte, dans ce cas, de deux images objectives différentes.

Il semble, d'après ce qui précède, qu'il n'est pas plus difficile de comprendre la vision simple avec les deux yeux que d'avoir la notion de l'unité des objets par le toucher au moyen des deux mains. Quand on fixe les yeux sur un objet placé à quelques mètres de distance, si l'on vient, sans changer la direction des axes optiques, à interposer le doigt ou une tige de bois vis-à-vis des yeux à quelques centimètres de distance, on a deux images du doigt ou de la tige, quoique d'une manière indistincte; ce n'est qu'en dirigeant les yeux sur le doigt ou sur la tige qu'on la voit simple et distinctement. Ainsi la direction des axes optiques fait que les deux images formées sur la rétine donnent une sensation simple.

Quant à la position exacte des objets, la vision simple avec un œil ne saurait la donner immédiatement sans que le toucher ou les rapports de position avec les objets extérieurs viennent faire juger du lieu où elle se trouve. L'expérience connue de Malebranche le montre aisément : si l'on place un anneau à quelque distance de soi et qu'en fermant un œil on cherche à passer le doigt dans l'anneau, on ne peut en général y parvenir immédiatement et l'on se trompe sur le lieu réel où il se trouve; en ouvrant les deux yeux l'erreur n'est pas possible. Cependant avec un seul œil on parvient aisément à juger la position des objets; mais il faut examiner d'autres objets voisins, comparer leurs grandeurs, leurs positions, et pour cela déplacer l'œil; avec les deux yeux, ce jugement est produit instantanément, probablement en raison de l'habitude que l'éducation des yeux nous a donnée. Ce fait de l'instantanéité est prouvé en illuminant une pièce d'un appartement par la décharge d'une bouteille de Leyde; la lumière ne dure qu'un instant

très-court et cependant ce temps suffit pour nous donner la notion de la position, de la grandeur et du relief des objets.

On n'a cité ici qu'un petit nombre des exemples que l'on pourrait donner au sujet des effets de la vision binoculaire, mais ils suffisent pour montrer que si dans l'état actuel de la science on ne peut donner une explication complétement satisfaisante des différentes circonstances qui peuvent se présenter, on peut dire d'une manière générale que la vision unique des objets avec les deux yeux vient de ce que les images objectives formées par un objet sur les deux rétines, sans être identiques, sont à peu près semblables, et de ce que la notion de la position de cet objet résulte de la convergence des axes optiques vers lui ; nous jugeons d'après cela qu'il est unique; c'est une question de jugement que l'éducation des yeux et l'habitude nous a appris à porter. La vision simple avec les deux yeux dépend donc de la manière dont nous interprétons nos sensations (1).

(1) Voir, pour plus de détails, Longet, *Traité de physiologie,* tome 2. — Giraud-Teulon, *Physiologie et pathologie de la vision binoculaire.* Paris 1861. — Helmholtz, *Optique physiologique.*

FIN DU TOME SECOND.

TABLE DES MATIÈRES.

SECONDE PARTIE.

EFFETS DE LA LUMIÈRE.

Pages.

PRÉLIMINAIRES.

LIVRE PREMIER.

EFFETS CALORIFIQUES.

LIVRE II.

EFFETS CHIMIQUES.

LIVRE III.

PHOTOGRAPHIE.

LIVRE IV.

EFFETS PHYSIOLOGIQUES.

LIVRE V.

DE LA VISION.

FIN.



ERRATA.

Une erreur typographique du 1er volume a été reproduite dans le second : dans différents passages, *au lieu* du nom écrit Herschell, *lisez :* Herschel.

Page 21, ligne 11, *au lieu de :* On A, *lisez :* On a.

Page 58, ligne 17, *au lieu de :* bleu de Prusse (cyanure de fer), *lisez :* bleu de Prusse { double cyanure, $(Fe\,Cy)^3$, $(Fe^2\,Cy^3)^2$, 9HO. }

Page 66, ligne 30, *au lieu de :* le chlorure, l'oxyde d'or... *lisez :* le chlorure et l'oxyde d'or.

Page 67, ligne 15, *au lieu de :* Phypson, *lisez :* Phipson.

Page 70, ligne 26, *au lieu de :* cyanoferrite, *lisez :* cyanoferride de potassium.

Page 72, ligne 13, *au lieu de :* cyanoferrite, *lisez :* cyanoferride de potassium.

Page 72, ligne 25, *au lieu de :* ferro cyanure rouge de potassium, c'est-à-dire le cyanoferrite, *lisez :* ferricyanure de potassium, c'est-à-dire le cyanoferride.

Page 150, ligne 12, *au lieu de :* oxalade, *lisez :* oxalate.

Page 150, ligne 25, *au lieu de :* insolatino, *lisez :* insolation.

Page 161, ligne 18, *au lieu de :* n'a plu, *lisez :* n'a plus.

AVIS POUR LE PLACEMENT DES PLANCHES DU 2e VOLUME.

Mettre à la page 81 la planche fig. 13, représentant les raies du spectre solaire.

Mettre à la page 342 la planche colorée, gamme chromatique des couleurs franches.

TYPOGRAPHIE FIRMIN DIDOT. — MESNIL (EURE).